



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DE LAS JUNTAS
CRÍTICAS DEL ROBOT PASIBOT**

Autor: Mario González Sainz

Tutor: Higinio Rubio Alonso

Leganés, Noviembre de 2011

Título: ESTUDIO DE LAS ARTICULACIONES CRÍTICAS DEL ROBOT
PASIBOT

Autor: MARIO GONZÁLEZ SAINZ

Director: HIGINIO RUBIO ALONSO

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Higinio por guiarme y ser una ayuda constante en este broche final en la universidad. Gracias Higinio.

También quiero agradecer a mis padres los esfuerzos y sacrificios que han realizado para darme la posibilidad de estudiar, no sólo estos últimos años en la universidad, si no desde que era un niño y me enseñasteis la importancia de la educación en una persona. Gracias.

A mi hermana por ayudarme cuando lo he necesitado, y cuando no también. Gracias por hacerme ver lo necesario que es esforzarse para sacar las cosas adelante.

To my lucky star for being so comprehensive and supportive.

RESUMEN

Mi proyecto “Estudio de las articulaciones críticas del robot Pasibot” se centra en el robot bípedo Pasibot perteneciente a la Universidad Carlos III de Madrid. En el proyecto se realiza un breve recorrido por la historia de los robots bípedos desde sus comienzos hasta los robots actuales.

En este proyecto se realiza un exhaustivo estudio de las articulaciones de la última versión modelizada del robot Pasibot. En el programa de simulación se le da al robot una velocidad de giro del motor, que es quién produce el movimiento inicial del robot. Del programa obtenemos los datos del comportamiento de las articulaciones, y se puede decidir cuáles de ellas deben ser estudiadas minuciosamente por ser las más críticas. Una vez establecidas cuáles son las articulaciones a estudiar se le da al motor del robot distintas velocidades de giro, haciendo que el robot se mueva más deprisa a mayor velocidad de giro del motor. Con los datos de las nuevas simulaciones con distintas velocidades de giro del motor podemos ver la evolución de los distintos parámetros en función de la velocidad de giro del motor y del tiempo, dándonos una información detallada que podremos usar en un futuro para un mejor diseño del robot Pasibot.

Palabras clave: Pasibot, marker, momento.

ABSTRACT

My project “Estudio de las articulaciones críticas del robot Pasibot” focuses on the biped robot Pasibot, belonging to the University Carlos III de Madrid. The project will provide a quick tour through the history of the biped robots from its beginnings to today's robots.

This project is an exhaustive study of the joints of the latest version of the modelled robot Pasibot. In the simulation program the robot is given a rotational speed of the engine, which produces the initial movement of the robot. From the program we obtain performance data of the joints, and give us information to decide which of them should be studied carefully. Having established which joints we should study, we give different speeds to the robot engine, making the robot move faster as higher engine speed. Using data from the new simulations with different engine speeds we can see the evolution of the different parameters depending on engine speed and time, giving us detailed information that we can use in the future to better design Pasibot robot.

Keywords: Pasibot, marker, momentum.

ÍNDICE GENERAL

<i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i>	19
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO	3
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	5
1.3 FASES DEL PROYECTO	7
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	8
<i>CAPÍTULO II: ROBÓTICA</i>	11
2.1 BREVE INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	13
2.2 LOS ROBOTS BÍPEDOS	14
2.2.1 ROBOTS PASIVOS:	14
2.2.2 ROBOTS ACTIVOS	20
<i>CAPÍTULO III: EL ROBOT PASIBOT</i>	27
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ROBOT PASIBOT	29
3.1.1 MECANISMO DE CHEBYSHEV	31
3.1.2 EXTENSIÓN	33
3.1.3 ESTABILIZACIÓN	36
3.1.4 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	37
3.2 MODELO FABRICADO	39
3.3 MODELO SIMPLIFICADO	40
<i>CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO</i>	47
4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS	49
4.1.1 PROCESO DE DISEÑO	52
4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	56
4.2.1 CONDICIONES INICIALES	56
4.2.2 MARKERS Y LOCALIZACIÓN	62
4.2.3 TOMA DE DATOS DE LA SIMULACIÓN	71
<i>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS</i>	79
5.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DEL ROBOT A ESTUDIAR	81
5.2 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 59	83
5.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 61	105
5.4 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 66	113
5.5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 89	134
<i>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES</i>	159
6.1 CONCLUSIONES	161
6.2 DESARROLLOS FUTUROS	167

<i>CAPÍTULO VII: PRESUPUESTO.....</i>	<i>169</i>
<i>7.1 INVERSIÓN DE TIEMPO EN EL ESTUDIO.....</i>	<i>171</i>
<i>7.2 COSTE DEL ESTUDIO</i>	<i>173</i>
<i>CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>175</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1 Robots Rh-0 y Rh-1	3
Figura 1.1.2 Robot Pasibot	4
Figura 2.2.1 Plano del robot pasivo Wilson Wilkie	14
Figura 2.2.2 Robot pasivo Wilson Walkie	15
Figura 2.2.3 Modelos de McGeer y Wisse	16
Figura 2.2.4. Movimiento de robot sin rodilla.....	17
Figura 2.2.5 Robot Toddler de MIT en proceso caminar	18
Figura 2.2.6 Imagen del robot Denise	19
Figura 2.2.7 Robot Ranger	20
Figura 2.2.8 Elektro en comparación con un hombre de tamaño medio.	22
Figura 2.2.9 El Wabot-2 con su antecesor el Wabot-1.....	23
Figura 2.2.10 La evolución de Honda	25
Figura 2.2.11 Robot Rh-0 y Rh-1 de la UC3M.	26
Figura 3.1.1 El robot Pasibot.....	29
Figura 3.1.2 Retrato de Chebyshev	31
Figura 3.1.3 Movimiento del mecanismo Chebyshev	32
Figura 3.1.4 Esquema e imagen del pantógrafo	33
Figura 3.1.5 Pantógrafo	34
Figura 3.1.6 Mecanismo Chebysev y Pantógrafo unidos.	35
Figura 3.1.7 Elementos de estabilización	36
Figura 3.1.8 Elementos del sistema de transmisión.....	37
Figura 3.1.9 Características técnicas del motor eléctrico	38
Figura 3.2.1 Pasibot simplificado	40
Figura 3.2.2 Tendón inferior y manivela.....	41
Figura 3.2.3 Tibia	42
Figura 3.2.4 Pies derecho e izquierdo.....	42
Figura 3.2.5 Imagen de juntas de revolución.....	43
Figura 3.2.6 Junta y actuador necesarios para el movimiento de ambas piernas	44
Figura 3.2.7 Nueva guía para la corredera.....	45
Figura 3.2.8 Trayectoria de la corredera y estabilizador con la nueva guía ...	46
Figura 4.1.1 Imagen inicial de arranque del programa Solid Edge ST	49
Figura 4.1.2 Gráfica explicativa de lo que aporta la tecnología síncrona.	50
Figura 4.1.3. Vista del diseño de un elemento del Pasibot en Solid Edge.	50
Figura 4.1.4 Imagen inicial del programa MSC ADAMS.....	51
Figura 4.1.5 Control de la simulación	53
Figura 4.1.6 Importación de archivo	54
Figura 4.1.7 Interactive simulation controls.....	54
Figura 4.1.8 Analysis create	54
Figura 4.1.9 Opciones de juntas	55
Figura 4.2.1 Pasibot en posición inicial.....	56
Figura 4.2.2 Pasibot en posición inicial con ejes cartesianos.....	57
Figura 4.2.3 Vista lateral derecha e izquierda del robot Pasibot en la simulación.....	58
Figura 4.2.4 Vista superior del robot Pasibot en la simulación.....	58

Figura 4.2.5 Dirección y sentido de la fuerza gravitatoria en la simulación ..	60
Figura 4.2.7 Localización de los centros de masa	66
Figura 4.2.8 Localización de los markers de la pierna izquierda	69
Figura 4.2.9 Localización de los centros de masa de la pierna izquierda.....	70
Figura 4.2.10 Menú de herramientas “Main Toolbox”	73
Figura 4.2.11 Menú desplegable.....	74
Figura 4.2.12 Ventana para la toma de datos de la simulación	74
Figura 4.2.13 MSC ADAMS Post/Processor	75
Figura 4.2.14 Ventana del Postprocesador	76
Figura 4.2.15 Archivo de imagen de la gráfica elegida.....	76
Figura 4.2.16 PostProcesador con los datos en forma de tabla	77
Figura 4.2.17 Exportación de tabla de datos	77
Figura 5.1.1 Posición de los markers elegidos para la toma de datos de las nuevas simulaciones con distintas velocidades de giro del motor.....	81
Figura 5.2.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59.....	83
Figura 5.2.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59.....	84
Figura 5.2.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	85
Figura 5.2.4 Movimiento traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	86
Figura 5.2.5 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59.....	87
Figura 5.2.6 Valores máximos y mínimos medios para la velocidad traslacional en X en función de la velocidad de giro del motor del marker 59	88
Figura 5.2.7 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59.....	88
Figura 5.2.8 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	89
Figura 5.2.9 Valores máximos y mínimos medios para la velocidad traslacional en Z en función de la velocidad de giro del motor del marker 5990	
Figura 5.2.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59.....	90
Figura 5.2.11 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59.....	91
Figura 5.2.12 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	92
Figura 5.2.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59	93
Figura 5.2.14 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59.....	93
Figura 5.2.15 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	94
Figura 5.2.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59.....	95
Figura 5.2.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59.....	95

Figura 5.2.18 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	96
Figura 5.2.19 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59	97
Figura 5.2.20 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	97
Figura 5.2.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59	98
Figura 5.2.22 Fuerza en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	99
Figura 5.2.23 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	100
Figura 5.2.24 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	100
Figura 5.2.25 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59	101
Figura 5.2.26 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	101
Figura 5.2.27 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59	102
Figura 5.2.28 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	103
Figura 5.2.29 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59	103
Figura 5.2.30 Momento en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59	104
Figura 5.3.1 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 61	105
Figura 5.3.2 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61	106
Figura 5.3.3 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 61	106
Figura 5.3.4 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 61	107
Figura 5.3.5 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61	107
Figura 5.3.6 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 61	109
Figura 5.3.7 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61	109
Figura 5.3.8 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 61	110
Figura 5.3.9 Momento en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61	110
Figura 5.3.10 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 61	111
Figura 5.3.11 Momento en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61	112
Figura 5.4.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66	113

Figura 5.4.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	114
Figura 5.4.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66	114
Figura 5.4.4 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66.....	116
Figura 5.4.5 Velocidad traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66	116
Figura 5.4.6 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	117
Figura 5.4.7 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66	118
Figura 5.4.8 Velocidad traslacional en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66	118
Figura 5.4.9 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66.....	119
Figura 5.4.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	120
Figura 5.4.11 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66	121
Figura 5.4.12 Velocidad angular en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66	121
Figura 5.4.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66	123
Figura 5.4.14 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	123
Figura 5.4.15 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66	124
Figura 5.4.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66.....	125
Figura 5.4.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	125
Figura 5.4.18 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66	126
Figura 5.4.19 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66.....	127
Figura 5.4.20 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66.....	127
Figura 5.4.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	128
Figura 5.4.22 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66.....	129
Figura 5.4.23 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66.....	130
Figura 5.4.24 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66.....	131
Figura 5.4.25 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66.....	131
Figura 5.4.26 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66.....	132

Figura 5.4.27 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 66.....	132
Figura 5.4.28 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66.....	133
Figura 5.4.29 Momento en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66.....	133
Figura 5.5.1. Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	134
Figura 5.5.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	135
Figura 5.5.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89.....	136
Figura 5.5.4 Movimiento traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89.....	137
Figura 5.5.5 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	138
Figura 5.5.6 Velocidades traslacionales máx. y mín. X para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89.....	139
Figura 5.5.7 Velocidades traslacionales máx. y mín. en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89.....	139
Figura 5.5.8 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	141
Figura 5.5.9 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	142
Figura 5.5.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89.....	143
Figura 5.5.11 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	144
Figura 5.5.12 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	144
Figura 5.5.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89.....	145
Figura 5.5.14 Valores máximos y mínimos de Aceleración traslacional en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89.....	145
Figura 5.5.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	146
Figura 5.5.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	146
Figura 5.5.20 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89.....	147
Figura 5.5.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	148
Figura 5.5.22 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89.....	148
Figura 5.5.23 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados.....	149
Figura 5.5.24 Pieza del elemento cadera con deslizadera simple y con deslizadera en T.....	150
Figura 5.5.25 Esfuerzos en el robot Pasibot sin deslizadera T.....	150

Figura 5.5.27 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89 con datos filtrados	151
Figura 5.5.28 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89.....	152
Figura 5.5.29 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89	152
Figura 5.5.30 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados.....	153
Figura 5.5.31 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89	154
Figura 5.5.32 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89.....	155
Figura 5.5.33 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados	155
Figura 5.5.34 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	156
Figura 5.5.35 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 89.....	156
Figura 5.5.36 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados	156
Figura 5.5.37 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89	157
Figura 6.1.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89.....	162
Figura 6.1.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89.....	163
Figura 6.1.3 Velocidades traslacionales máx y mín X para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89	163
Figura 6.1.4 Velocidades traslacionales máx. y mín. en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89	164
Figura 6.1.5 Valores máximos y mínimos de Aceleración traslacional en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89.....	164
Figura 6.1.6 Valores de la Fuerza en X para los markers 59 y 61.....	165
Figura 6.1.7 Valores del Momento en Z para los markers 59 y 61	165
Figura 6.1.8 Valores del Fuerza en Z para los markers 59 y 61.....	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	30
Tabla 4.1	59
Tabla 4.2	59
Tabla 4.3	59
Tabla 4.4	60
Tabla 4.5	61
Tabla 4.6	62
Tabla 5.1	81
Tabla 7.1 Desarrollo cronológico de las fases del proyecto	172
Tabla 7.2 Desglose de los costes del proyecto	174

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Hoy en día es innegable la importancia de la robótica, tanto en la vida cotidiana como en la industria. En el mundo actual es de vital importancia la existencia de máquinas a las que dándoles una serie de indicaciones nos permitan realizar tareas que nos ahorran esfuerzo, y aún más importante nos eximen de realizar algunas tareas peligrosas que podían poner en riesgo vidas humanas.

Una de las tendencias más interesantes en la actualidad es la automatización industrial, que se puede ver sobre todo en las cadenas de montaje. También podemos ver como en el mundo de la medicina se dan grandes avances que permiten por ejemplo una mayor precisión quirúrgica.

Otra tendencia muy importante es la de los robots humanoides. Es un proceso harto complicado el dotar de apariencia y funcionalidad humana a una máquina, sin embargo no son menores los esfuerzos que se están realizando a este respecto.

La universidad Carlos III inició hace algún tiempo proyectos de investigación en este campo. Uno de ellos se centra en la robótica humanoide, y lo realiza el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Hasta la fecha han desarrollado dos prototipos, el *Rh-0* en el año 2004 y el *Rh-1* en el 2007. Ambos han sido desarrollados bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer. Las siglas Rh significan Robot Humanoide, y en ambos casos, el funcionamiento de los robots es muy parecido. La gran diferencia apreciable es la incorporación de una carcasa protectora en el modelo Rh-1.

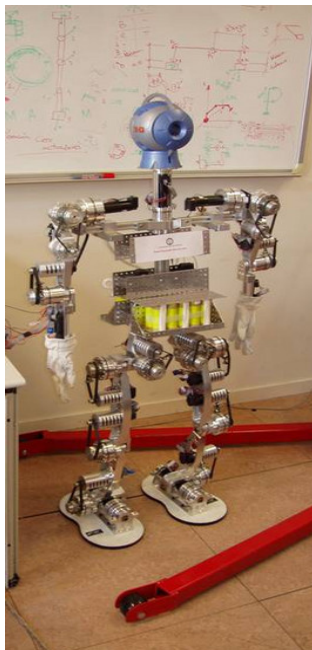


Figura 1.1.1 Robots Rh-0 y Rh-1

Sin embargo el robot que es objeto de estudio de este proyecto es el robot Pasibot perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica. El robot Pasibot se caracteriza fundamentalmente por tener un único grado de libertad, a diferencia de por ejemplo el robot Rh-a que tiene 21 grados de libertad. El hecho de tener un único grado de libertad supone un diseño muy preciso del mismo para tener un correcto funcionamiento. Pero esta característica también reporta ventajas como mayor ligereza o un menor número de actuadores. Lo cual supone un menor consumo que es otra ventaja del robot, el aspecto económico.

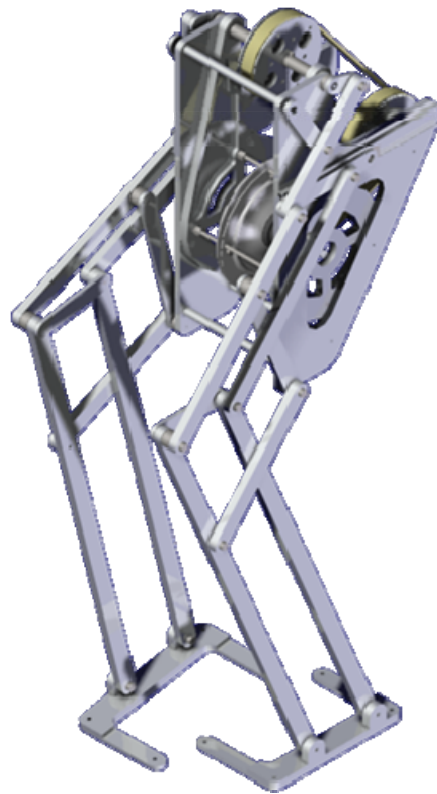


Figura 1.1.2 Robot Pasibot

El robot Pasibot fue construido en el taller de la universidad y se intentó hacerlo caminar, pero se vio que el robot vuelca lateralmente a los pocos pasos de haber comenzado a andar. Por esta razón existen multitud de proyectos relacionados con este robot, para analizar y mejorar su funcionamiento.

Estas son algunas de las motivaciones que me han impulsado a realizar este proyecto, las numerosas posibilidades que ofrece el mundo de la robótica, y la posibilidad de trabajar con uno de estos robots de manera cercana.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo que se persigue con la realización de este proyecto es el de avanzar en el proceso de análisis del robot bípedo PASIBOT, con el fin de conseguir un funcionamiento del mismo más estable.

Para progresar en el desarrollo del análisis del robot Pasibot se ha realizado una simulación del comportamiento del robot al caminar a varias velocidades, usando el programa MSC. ADAMS. Se ha realizado un estudio exhaustivo del comportamiento geométrico, cinemático y dinámico de todos los elementos que componen el robot Pasibot, que suponen parte fundamental de su estructura y son imprescindibles para su buen funcionamiento.

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es el estudio mecánico detallado de todas las juntas del robot Pasibot, para posteriormente efectuar un análisis todavía más específico de sus puntos críticos.

Para alcanzar exitosamente el objetivo principal que nos hemos marcado son necesarios completar también una serie de objetivos previos que nos permitan establecer una serie de conclusiones sobre el comportamiento del robot Pasibot y nos den un conocimiento más preciso del funcionamiento del mismo.

Los hitos que se deben alcanzar para obtener la consecución del objetivo principal del presente proyecto son:

- Simulación del modelo de Pasibot en MSC.ADAMS, a las velocidades elegidas al efecto.
- Toma de datos obtenidos en la simulación del robot de todos los puntos representativos de la estructura del robot Pasibot.
- Exportación de los datos obtenidos a programas de manipulación de datos con el objetivo de facilitar el estudio de los mismos.
- Análisis de cada uno de los puntos geométrica, cinemática y dinámicamente.
- Minimizar y canalizar el número de datos con el fin de seleccionar los puntos de mayor importancia y más críticos, para posteriormente realizar nuevas simulaciones con diferentes velocidades y tomar datos de estos puntos.

- Analizar cuáles son los parámetros más representativos para los distintos elementos que componen al robot con diferentes velocidades de giro del motor.
- Analizar los cambios en los diferentes parámetros para las distintas velocidades de giro del motor.

1.3 FASES DEL PROYECTO

En todo proyecto de ingeniería hay una serie de fases para la elaboración del mismo, desde la búsqueda de objetivos del proyecto al análisis final y conclusiones del proyecto. Este es un proyecto de investigación, y para ello he pasado por diferentes fases utilizando diferentes programas informáticos de simulación que me han permitido realizar un estudio del comportamiento del robot Pasibot.

Las fases planificadas han sido:

- Fase 1: Se realiza un estudio previo de los objetivos a conseguir en el proyecto. Se analiza las necesidades existentes para alcanzar esos objetivos, como las herramientas que serán necesarias emplear.
- Fase 2: Una vez se conocen las herramientas a utilizar, se pasa a familiarizarse con ellas. En este proyecto esas herramientas son los programas informáticos de diseño y simulación Solid Edge ST y MSC. Adams.
- Fase 3: Cuando ya existe un dominio de los programas a utilizar se pasa a la realización de la simulación. En esta fase se le da al robot una serie de condiciones y se estudian los parámetros decididos en la Fase 1.
- Fase 4: Una vez realizado el estudio del comportamiento del robot en el programa de simulación, pasamos al apartado de análisis, en el que se estudia el comportamiento que ha tenido el robot en la simulación y se determinan aquellos puntos en los que el robot tiene mayores exigencias mecánicas, y cuales serán los parámetros más influyentes en el comportamiento del robot.
- Fase 5: Una vez realizada esta parte se varía la velocidad de giro del motor realizando nuevas tomas de datos de aquellos puntos más importantes del robot.
- Fase 6: En la última fase se comprobará que los resultados sean acordes a los objetivos establecidos en la primera fase.

Las fases más destacadas de este proyecto son la cuarta y la quinta, ya que es en estas donde se realiza el estudio en la simulación y el análisis de resultados, lo cual es sin duda alguna, la parte más complicada del proyecto.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se encuentra dividido en varios capítulos, aparte también se incluye el anexo con el total de todas las gráficas realizadas para el estudio en simulación.

Capítulo I: Introducción

En este primer capítulo se explican las motivaciones para la realización del proyecto, así como los objetivos planteados y las fases necesarias para satisfacer estos objetivos.

Capítulo II: Robótica

En este capítulo se realiza una introducción al mundo de la robótica desde sus inicios, hasta algunos de los modelos más novedosos que se pueden encontrar hoy en día clasificados dependiendo de las características de cada tipo de robot.

Capítulo III: El robot Pasibot

En el tercer capítulo se describe al robot Pasibot en profundidad, las piezas que lo componen, y el sistema de movimiento en el que está basado. Se describe la composición del robot y el material del que está fabricado, o el mecanismo de Chebyshev sobre el cual se basa el movimiento necesario para hacerlo caminar.

Capítulo IV: Desarrollo del proyecto

En este capítulo se realiza una descripción de las herramientas utilizadas en el programa, y una breve introducción a su utilización. También se explica el planteamiento del problema que vamos a realizar, y una descripción de la localización de los markers, o puntos de estudio del robot donde se van a analizar diferentes parámetros.

Capítulo V: Análisis de los resultados

Este será el capítulo más extenso y con mayor importancia, ya que siendo éste un proyecto de investigación, el análisis de los resultados será fundamental. En él veremos cómo varían los distintos parámetros, de los que tomamos datos de cada punto del robot, con las distintas velocidades de giro del motor.

Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se comentarán las conclusiones obtenidas tras el estudio y análisis de los datos exportados desde el programa de simulación.

Una vez establecidas todas las posibles conclusiones extraíbles a partir del estudio del modelo simulado del robot Pasibot, podremos pasar a describir posibles trabajos futuros que sean un desarrollo a partir de éste, o que puedan comenzar una nueva línea de investigación paralela gracias a la información reflejada en este proyecto.

Capítulo VII: Presupuesto

Para terminar de completar el estudio realizado se hará un presupuesto en el que se desglose aquellos costes vinculados al estudio necesario para la realización de este proyecto de fin de carrera.

Capítulo VIII: Bibliografía

En este capítulo se detallarán los libros, páginas web, revistas o cualquier documento consultado para la realización del proyecto.

Capítulo IX: Anexos

En este capítulo se recogen todas y cada una de las gráficas realizadas y analizadas durante todo el proceso de estudio del robot Pasibot para todas las velocidades de giro del motor utilizadas.

CAPÍTULO II: ROBÓTICA

2.1 BREVE INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

La robótica es un término de dominio público del que, aunque se tiene una idea general de sus aplicaciones y de su potencial, pocos conocen el origen de la palabra o de las aplicaciones útiles que la hicieron surgir. La robótica actual se originó hace miles de años, de hecho, antiguamente se les conocía no como robots sino como autómatas.

Desde hace siglos el ser humano ha construido máquinas que imiten partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Estos brazos fueron operados por sacerdotes, quienes clamaban que el movimiento de estos era inspiración de sus dioses.

El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, o la tecnología en sensores, han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50's. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

No obstante las limitaciones de las máquinas robóticas actuales, el concepto popular de un robot es que tiene una apariencia humana y que actúa como tal. Este concepto humanoide ha sido inspirado y estimulado por varias narraciones de ciencia ficción.

2.2 LOS ROBOTS BÍPEDOS

Los robots bípedos son un tipo de robot que tiene movimiento, es decir, que son móviles. Para realizar este desplazamiento utilizan dos piernas, las cuales emulan la forma de andar de los humanos, o por lo menos es la intención. Dentro de este rango de robots, se puede distinguir entre dos tipos.

2.2.1 ROBOTS PASIVOS:

Estos robots fueron los primeros que aparecieron en el mundo de la robótica. Son aquellos que no disponen de motores ni de ninguna alimentación energética para su funcionamiento. Su forma de desplazarse es aprovechando los desniveles y los planos inclinados, haciendo de esta manera que la gravedad sea su motor. La principal ventaja de este tipo de robots pasivos es la relación eficiencia-energía. Al no tener motores, no gastan y son altamente eficientes. Como desventaja cabe destacar que su direccionalidad es inducida, es decir, difícilmente controlable, y subir un plano inclinado, imposible.

El primero robot pasivo de la historia fue el “Wilson Walkie”. El Wilson Walkie es en realidad un juguete en forma de pingüino que camina sobre una rampa en dirección descendente. Fue patentado por John E. Wilson el 13 de diciembre de 1938. El plano que fue entregado a la oficina de patentes es el que aparece en la imagen siguiente.

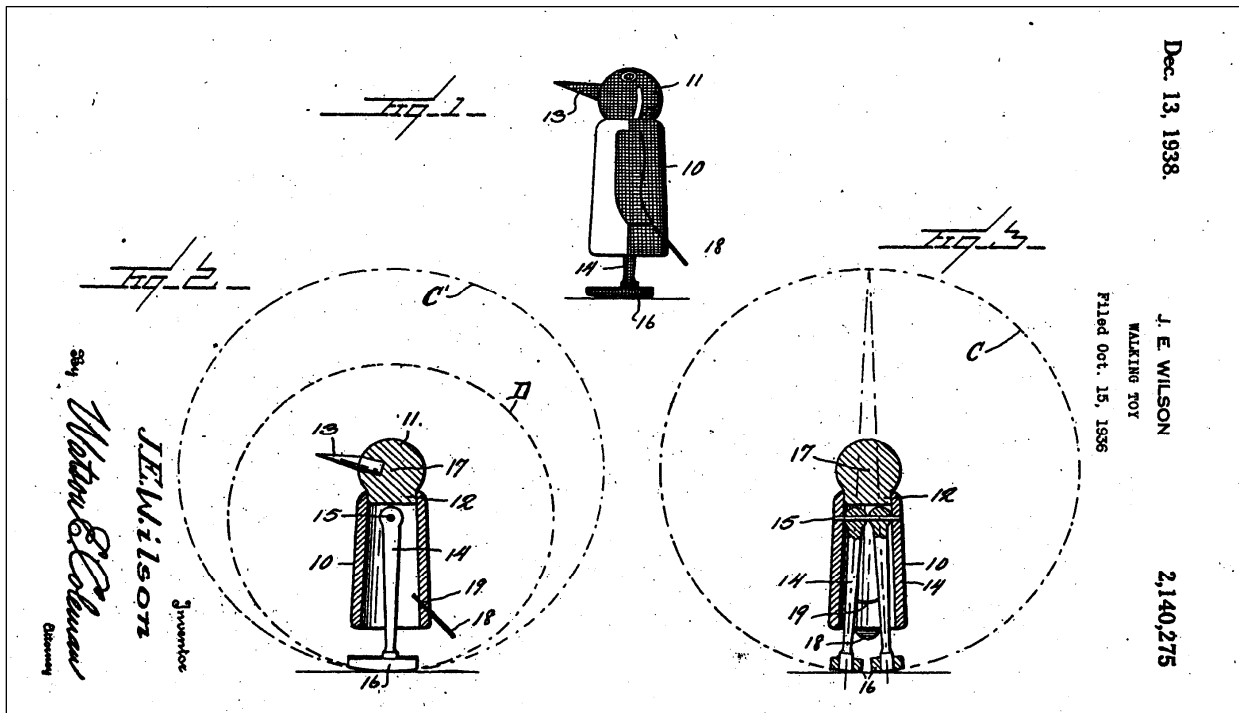


Figura 2.2.1 Plano del robot pasivo Wilson Wilkie



Figura 2.2.2 Robot pasivo Wilson Walkie

El Wilson Walkie era, como se puede apreciar en la imagen, un juguete hecho a base de madera y tela. Su funcionamiento consiste en que sus piernas giran dentro de un cono. Esta configuración de piernas dentro de un cono favorece que cuando el juguete se coloca en una rampa, puede descender a través de ella sin necesidad de ningún actuador.

Esta fue la inspiración para el ingeniero aeronáutico Tad McGeer, quién, en la parte final de la década de los ochenta y principios de los noventa, desarrolló la base de lo que hoy conocemos como robots dinámicos pasivos. La base de sus cálculos están relacionados con estudios realizados en Harvard una década antes por un tal Tom McMahon, que según se da a entender, fue inspirado por un juguete que le regalaron de pequeño, seguramente un Wilson Walkie.

La fascinación de McGeer en sus investigaciones y en el funcionamiento de este juguete como robot pasivo, le llevo a fundar un grupo, denominado *Insitu*, donde se dedicaban a realizar naves robóticas en miniatura. Básicamente, buscaban desarrollar sistemas robóticos en los cuales no fuese necesario emplear mucha energía. Atendiendo a una cita del propio McGeer: “Las primeras pruebas las hicimos con pequeñas máquinas que bajaban por una rampa sólo con la ayuda de la gravedad. Desde ahí fuimos agregando más dinamismo y menos motores, así hemos cortado la energía utilizada”.

Todo este interés que se ha activado con relación a los robots bípedos pasivos se debe al interés de los investigadores de extrapolar sus hallazgos para entender mejor el funcionamiento del andar humano, y con esto, ser capaces de mejorar los sistemas utilizados para ayudar a las personas con algún problema a caminar, I.e. las prótesis.

De los primeros robots de estas características podemos destacar uno creado por Martin Wisse realizado en la Universidad de Cornell en el año 1998. Construyendo finalmente un andador pasivo dinámico de tres dimensiones articulado con rodillas, basados en simulaciones hechas en plano.

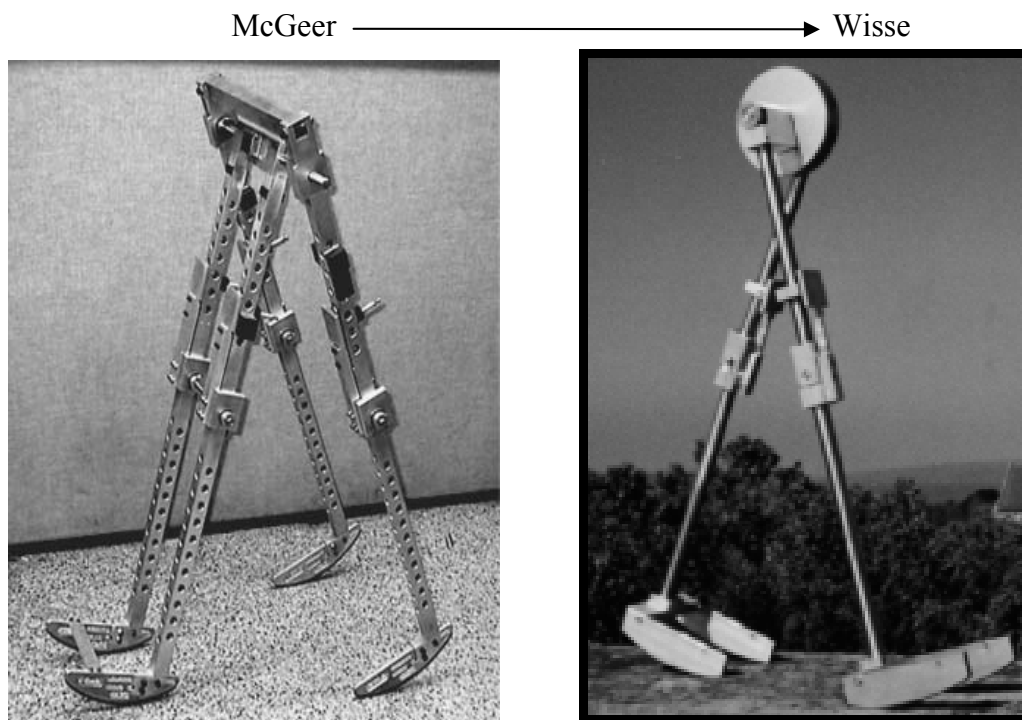


Figura 2.2.3 Modelos de McGeer y Wisse

Después de alcanzar los modelos representados en la imagen superior, los avances en los robots bípedos no han sido demasiados. En realidad, no podemos destacar ningún avance hasta el año 1994. En ese año, y con excusa de la reunión que realiza la *Asociación Americana para el Avance de la Ciencia (AAAS)*. En esta reunión se presentaron tres equipos de investigación que habían conseguido construir robots, que eran muy parecidos en sus movimientos, pasos y forma de andar a los humanos.

Las tres universidades en cuestión son Delft (Holanda), MIT (EEUU) y Cornell (EEUU). Los tres modelos presentados presentan una serie de características comunes pero cada uno aporta su particularidad. Los tres robots aportan una variación con respecto a otros modelos de “juguetes” que caminan, y esta variación es la de balancearse. Hasta la fecha, los robots que caminaban se tenían que balancear de manera excesiva para conseguir levantar los pies, este proceso en el caminar humano se

ve reducido, en cantidad de balanceo, debido a la existencia de las rodillas. En el caso de los robots de Cornell y Delft, este proceso lo consiguen utilizar, dándole al robot un caminar mucho más natural y menos ortopédico.

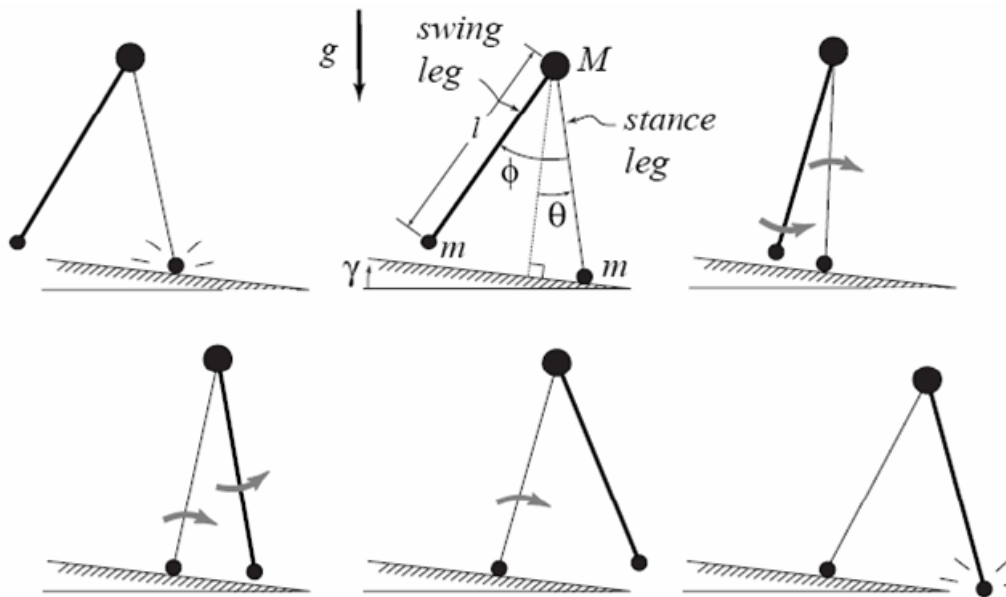


Figura 2.2.4. Movimiento de robot sin rodilla.

Toddler (MIT).

El robot Toddler es el que quizás se parece menos a la forma de andar a los humanos, pero en cambio es el más inteligente de los tres. La diferencia a la hora de andar es que no tiene rodillas que flexiona para realizar un paso, sino que únicamente se balancea para facilitar el proceso de levantar las piernas. Lo curioso está en su capacidad de aprender las cosas.

En un tiempo relativamente corto, utilizando un cerebro que necesita menos energía que la que necesitaría un cerebro de hormiga, es capaz de enseñarse a caminar. Esto es, tiene un sistema de identificación del terreno y un sistema central con inteligencia artificial que le permite procesar toda la información. En un espacio de aproximadamente 20 minutos, o el equivalente a 600 pasos, el robot es capaz de enseñarse a sí mismo como caminar sobre la superficie en cuestión.

Este robot Toddler, que precisamente utiliza este nombre en relación a la franja de edad de los niños pequeños cuando empiezan a caminar, es el primer robot que puede caminar sin tener información previamente insertada en su sistema. Su avanzado sistema de aprendizaje permite que se mueva eficazmente por una serie de superficies consiguiendo un resultado aceptable incluso sobre superficies rocosas.

El objetivo del proceso de aprendizaje de Toddler es encontrar una ley de control que establezca la marcha del robot en terreno plano, usando como función objetivo el patrón de marcha que aparece al descender de forma pasiva una pendiente.

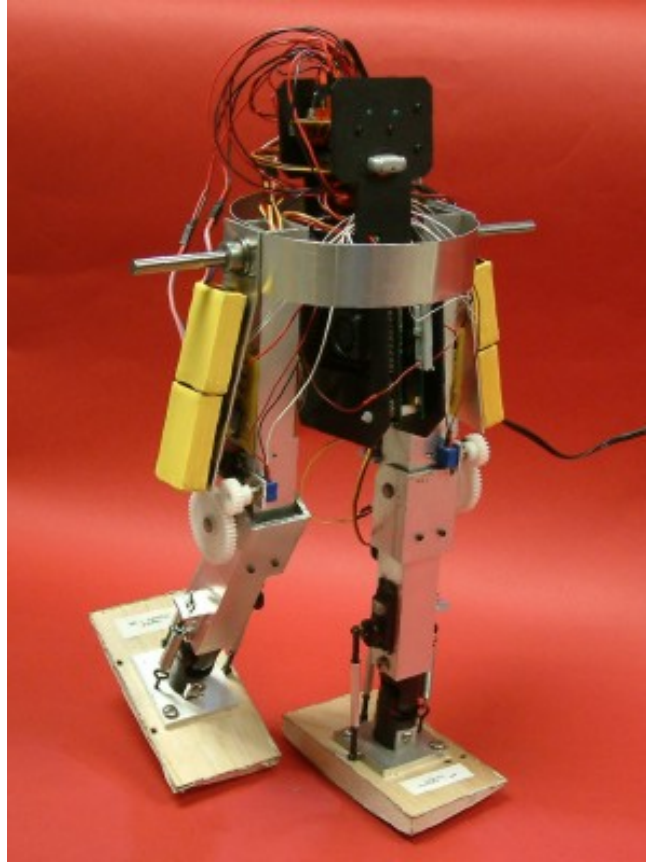


Figura 2.2.5 Robot Toddler de MIT en proceso caminar

Robot Denise (Universidad de Delft).

El robot de la universidad de Delft se llama Denise, nombre de mujer en parte debido a que su tamaño es el de una mujer de tamaño medio. A diferencia del Toddler, no tiene capacidad de aprendizaje sobre el terreno pero sí tiene la capacidad de doblar sus rodillas. En el aspecto de funcionamiento, es muy parecido al robot desarrollado por Cornell, el cual detallaremos a continuación y ambos de los cuales solo pueden caminar hacia adelante.

El avance de este robot y el de Cornell se basa en su diseño mecánico, evitando así los grandes problemas de control que suelen tener los robots bípedos. Denise es un robot con características antropomórficas inspirado en la manera que un patinete o una bicicleta mantienen su estabilidad.

La cadera está equipada con músculos McKibben, unos actuadores neumáticos que pretenden reproducir los músculos humanos. Así, mediante un diseño adecuado de la articulación del tobillo se acopla la inclinación lateral del robot con el giro respecto a

su eje vertical, lográndose una estabilidad lateral suficiente como para que Denise ande. Para ello, la articulación del tobillo permite el giro en la dirección de la marcha. El parámetro crítico que determina la estabilidad de Denise es el ángulo que forman el pie y la pierna en el plano sagital, que está también relacionado con la velocidad mínima a la que tiene que caminar para no caerse.

Según comentan los investigadores de la Universidad de Delft “Un menor número de movimientos motorizados es el secreto para la eficiencia energética. Si no están bien diseñados, los motores absorben energía. Para reducir esta energía hay que reducir el trabajo que realizan los motores” [1].

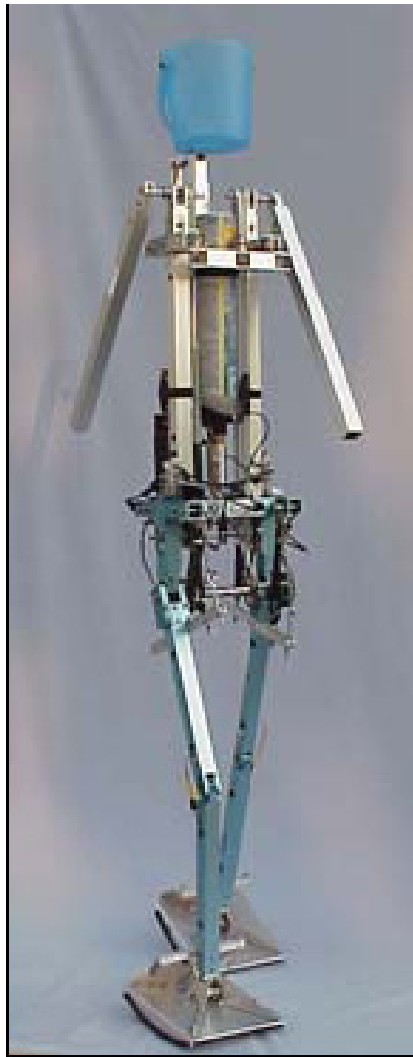


Figura 2.2.6 Imagen del robot Denise

ROBOT RANGER (Cornell University)

El robot bípedo llamado Ranger de la Universidad de Cornell mide un metro, tiene dos patas largas con articulaciones (caderas, rodillas y tobillos) dos brazos, una barra corta en lugar de torso y una caja plana por cabeza, donde va un pequeño microcontrolador y un par de baterías a cada lado.

El funcionamiento de este robot es de tal éxito debido a que explota eficazmente el equilibrio y la dinámica del balanceo natural, de manera que precisa muy poca energía para desplazarse. De hecho, fue diseñado para consumir energía únicamente en el proceso de levantar el pie, siendo la gravedad la que lleva el pie al contacto con el suelo nuevamente.

Una vez conseguido el simular la manera de caminar de los humanos, los robots buscan minimizar la energía. El sistema explicado anteriormente mezclando el aporte de energía con la gravedad es un gran ejemplo.

De hecho, este robot de la Universidad de Cornell es la única máquina andante (no pasiva) que consume menos energía al andar que el hombre: su Coste de Transporte (COT) definido como la energía consumida para mover una unidad de peso una unidad de distancia, es de 0.2, frente al 0.3 del ser humano o el 3.2 de ASIMO. Este avance es enorme ya que los robots más avanzados necesitan hasta decenas de motores para conseguir andar, y por tanto, un consumo mucho mayor.

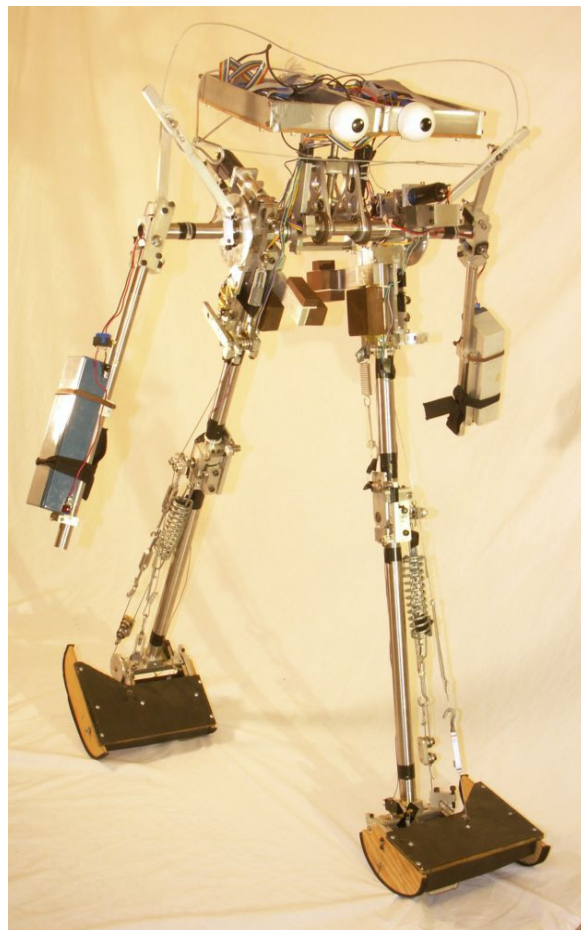


Figura 2.2.7 Robot Ranger

2.2.2 ROBOTS ACTIVOS

Por robot activo se entiende aquel que para generar movimiento necesita la actuación de una fuerza externa, tal como un motor. Los robots activos han ido evolucionando a lo largo de la historia, igual que los pasivos, desde el modelo inicial, que constaba de un único actuador, hasta los modelos que se encuentran actualmente funcionando, que constan de decenas de motores. Cada motor conlleva su propio sistema de control y un aumento de grados de libertad del sistema. Cada vez que se le añade un grado de libertad al sistema se le está añadiendo peso.

En lo referente a la robótica activa de bípedos, las investigaciones han tenido mayores proliferaciones. Estas proliferaciones se deben a que muchas empresas de capital privado han visto en el desarrollo de estos robots un valor seguro para el futuro. Tal es el caso que empresas líderes como Honda o Toyota destinan millones de dólares cada año para profundizar más en su desarrollo.

Estos robots activos son denominados también humanoides, actualmente, los que se desarrollan tienen un gran número de actuadores. Estos actuadores son fundamentales para poder controlar el gran número de grados de libertad del que consta el sistema.

Todos estos robots se controlan de manera similar a los manipuladores industriales, se basan en el control de trayectorias. La marcha se sintetiza como una trayectoria continua a lo largo del espacio, que el robot debe seguir manteniendo su estabilidad local. Durante años se ha satisfecho esta restricción usando el paradigma del “Punto de Momento Cero (“Zero Moment Point”, ZMP) propuesto por Vukobratovic. El ZMP se define como el punto del suelo respecto al cual el momento creado por las fuerzas inerciales y gravitacionales no tiene componente en los ejes horizontales. Para garantizar la estabilidad, el ZMP debe mantenerse en el polígono de sustentación, la superficie que definen los pies en contacto con el suelo. En definitiva, fue el primer sistema útil propuesto para explicar la locomoción bípeda.

Existen otro tipo de criterios de estabilidad tal como el “Indicador de la Rotación del Pie” (“Foot Rotation Indicator”, FRI), aunque menos utilizados. Sea cual sea el criterio de estabilidad utilizado, una vez que este criterio esté garantizado, el robot será capaz de caminar de forma segura [2].

Durante los años, la evolución de los humanoides, aunque siguiendo técnicas parecidas, ha ido variando según la institución o empresa que ha desarrollado las tecnologías y que las ha ido implantando de manera eficaz. Si hiciésemos un resumen exhaustivo de todos los desarrollos de robots humanoides en los últimos años sería demasiado largo, por tanto, mencionaremos algunos de los más destacados a modo informativo de sus funciones y avances.

ELEKTRO 1939: Es el nombre por el cual se conoce a el robot construido por la Westinghouse Electric Corporation entre los años 1937 y 1938. Aparece oficialmente en la Feria Mundial de Nueva York de 1939. Estaba construido de acero con un esqueleto de motor cubierto por “piel” de aluminio. Medía siete pies de altura y pesaba 120 Kg. En apariencia era humanoide, pudiendo caminar por comandos de voz. Su capacidad de habla se la proporcionaba una gramola de 78 rpm, la cual le proporcionaba una amplitud de 700 palabras, también fumaba cigarrillos e inflaba globos. Todas estas cualidades eran bastante espectaculares para un robot que además movía los brazos y la cabeza. Este es quizás el primer robot que se desarrolla fuera de las máquinas herramientas, es decir, un robot que no es para la industria sino meramente para la diversión de los humanos.

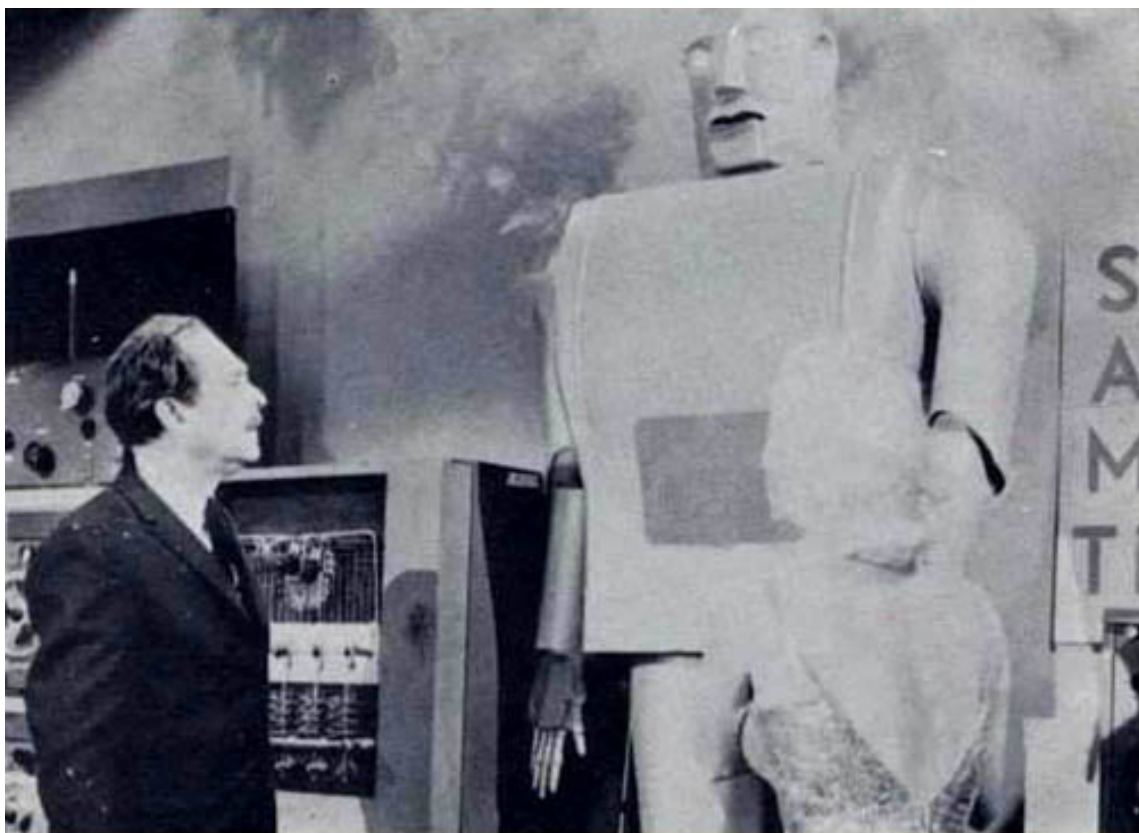


Figura 2.2.8 Elektro en comparación con un hombre de tamaño medio.

WABOT-1 (1973): con el fin de desarrollar este proyecto, se unieron cuatro laboratorios de la misma universidad, creando un Grupo de Bio-Ingeniería. Wabot es el nombre determinado por la conjunción del nombre de la universidad, Universidad de Waseda, y la palabra robot, WABOT. Este robot, fue el primer robot antropomorfo a escala desarrollado en el mundo. Consistía en un sistema de control de extremidades, un sistema de visión y un sistema de conversación. El Wabot-1 fue capaz de comunicarse con una persona en japonés, medir distancias y direcciones de objetos usando receptores externos, oídos y ojos artificiales, y una boca artificial. Caminó con sus miembros

inferiores y fue capaz de agarrar y transportar objetos con las manos usando sensores táctiles. Se estimaba que el Wabot-1 tenía la facultad de un niño de un año y medio.

Con los años, este primer robot, revolucionario en su tiempo, fue evolucionando y a los siete años de lanzar el Wabot-1 se lanzó el Wabot-2. En el año 1980 los laboratorios que participaron en el proyecto WABOT1 se volvieron a unir de nuevo para iniciar el proyecto WABOT-2. Tocar el piano requiere el uso de una función inteligente que el robot WABOT-2 era capaz de realizar, así como las actividades artísticas, tocar el piano requeriría habilidades humanas como la inteligencia y la destreza. Por lo tanto el WABOT-2 se define como un “robot especialista”, en lugar de un robot versátil como lo fue el WABOT-1. El robot músico WABOT-2 puede conversar con una persona, leer una partitura musical normal con los ojos y jugar con un juego de melodías de dificultad media en un órgano electrónico. También es capaz de acompañar a una persona mientras la escucha cantar. El WABOT-2 fue el primer hito en el desarrollo de un robot “personal”.

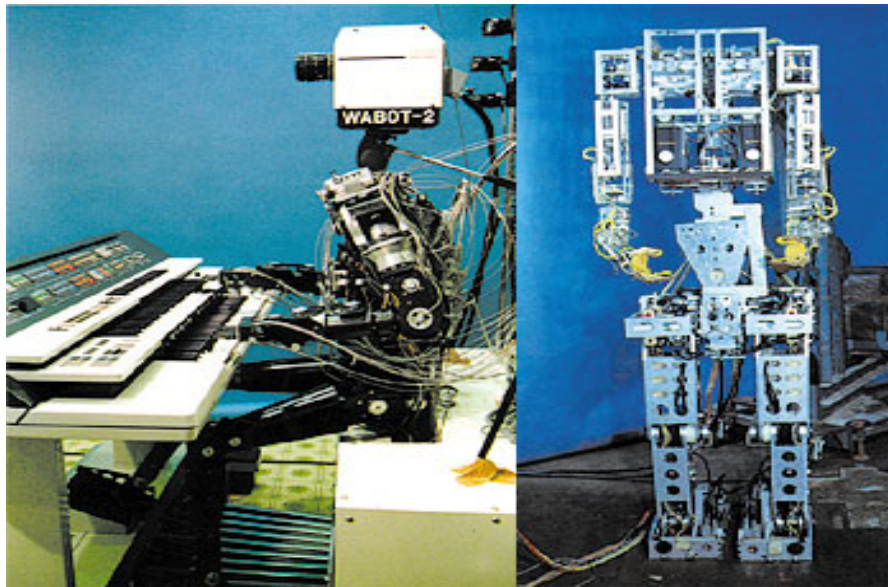


Figura 2.2.9 El Wabot-2 con su antecesor el Wabot-1.

HUMANOIDES HONDA: En 1986 Honda hace su primer esfuerzo por crear un humanoide. El predecesor de las maravillas que existen hoy en día se llama E0. Este robot era capaz de andar en línea recta, con una pierna detrás de la otra, pero con 5 segundos de intervalo entre pasos. Los sucesivos E1, E2 y E3 consiguieron andar más rápido. El E2 fue el primero con movimiento dinámico con cierta autonomía entre piernas. En 1991 se cerró el desarrollo de la primera fase, habiendo conseguido éxitos como caminar a una velocidad más o menos constante y que se simulara el andar humano. Además de esto, la nueva tecnología fue incorporada para conseguir que los robots pudieran controlar el balanceo de su cuerpo y tuvieran la habilidad de avanzar sobre pisos en los que hubiese obstáculos simples.

El E4 conseguía andar a la velocidad que un humano anda de manera rápida. El hermano mayor, el E5 fue el primer robot autónomo de su tipo y predecesor del mayor logro hasta el momento, el E6. Este último fue el primero en conseguir controlar sus propios balanceos. Esto le permitía subir y bajar escaleras, salvar obstáculos o subir rampas. Conseguido el movimiento de piernas Honda se embarcó en una nueva aventura, incluirle un tronco y brazos que se pudieran mover, dándole el semblante lo más parecido a un humano.

El P3 fue el primer robot humanoide bípedo, imitador de la forma de andar humana, completamente independiente. Fue finalizado en 1997. La altura y peso del P3 se redujeron considerablemente gracias al cambio de los materiales empleados así como el hecho de descentralizar el sistema de control. Su pequeño tamaño lo hace mejor adaptado a los entornos de trabajo humanos. El P3 fue el que permitió a Honda introducir la estética ASIMO, atractivo para millones de personas tanto funcional como estéticamente.

En el año 2000 Honda presentó la primera versión del popular ASIMO, un robot que medía sólo 1,2 m de altura y había rebajado su peso hasta los 52 Kg. Era capaz de caminar a 1,6 Km/h, podía permanecer en funcionamiento durante 30 minutos seguidos y sus baterías necesitaban de 4 horas para recargarse por completo.

El nombre ASIMO proviene de Advanced Step in Innovative Mobility, es pronunciado “ashimo” en japonés y significa “piernas también”. Este menudo robot es el resultado de catorce años de investigación por parte de Honda en la mecánica de la locomoción bípeda. Cerca de 40 de los 2000 modelos que existen del ASIMO están dando la vuelta al mundo mostrando su potencial en actos promocionales.

En el año 2005 Honda presentó un nuevo ASIMO. Con el mismo tamaño que el prototipo del 2004, pero capaz de caminar a 2,7 Km/h (1,6 Km/h en caso de llevar una carga de 1 Kg) y correr a 6 Km/h en línea recta y 5 Km/h en círculos. Se crea para aplicaciones profesionales tales como repartir café, entregar mensajes, empujar carritos, etc. Esto ha hecho que Honda empiece a “contratar” ASIMOS como recepcionistas en sus oficinas principales, para después comenzar a alquilarlos a otras empresas por aproximadamente 200.000€ al año. En el año 2007 se consiguió que trabajara en equipo con otros robots como él y que pueda moverse cómodamente entre personas.

Para permitir a ASIMO funcionar en un entorno de oficina, Honda ha desarrollado una tarjeta de telecomunicación. Esta tarjeta almacena y comunica inalámbricamente información del personal, así ASIMO puede reconocer unívocamente a sus compañeros de trabajo, además de aplicar otros reconocimientos faciales o por voz para confirmar su identidad. El hecho de que ASIMO detecte la fuerza ejercida sobre sus brazos le permite aplicar presión en los carros mientras los equilibra, o coger las manos de una persona y permitir que ésta le guíe en su movimiento. Queda claro que se

ha evolucionado a tal nivel que es una herramienta para facilitar el trabajo humano y no un simple juguete.



Figura 2.2.10 La evolución de Honda

Vistos los primeros diseños de humanoides y la evolución temporal de Honda, quizás la empresa más avanzada en el desarrollo de robots con forma humana que faciliten nuestras tareas, no está de más mencionar los desarrollos que se están realizando dentro del departamento de Robótica de la Universidad Carlos III de Madrid. Hasta la fecha han desarrollado dos prototipos, el *Rh-0* en el año 2004 y el *Rh-1* en el 2007. Ambos han sido desarrollados bajo la financiación de la CICYT (Centro de Investigación Científica y Tecnológica) y dirigidos ambos proyectos por el profesor Carlos Balaguer. Las siglas Rh significan Robot Humanoide, y en ambos casos, el funcionamiento de los robots es muy parecido. La gran diferencia apreciable es la incorporación de una carcasa protectora en el modelo Rh-1.

Las características comunes a ambos modelos son:

- Tamaño natural: 1,5 m.
- Peso: 50 kg incluidas baterías.
- Dispone de 21 grados de libertad: 6 GDL en cada pierna. 3 GDL en cada brazo, 1 GDL en la cabeza.
- 2 ordenadores a bordo.
- Sensores a bordo: 2 Fuerza/Par en los brazos; 3 inclinómetros y 3 acelerómetros.
- Conexión wi-fi.

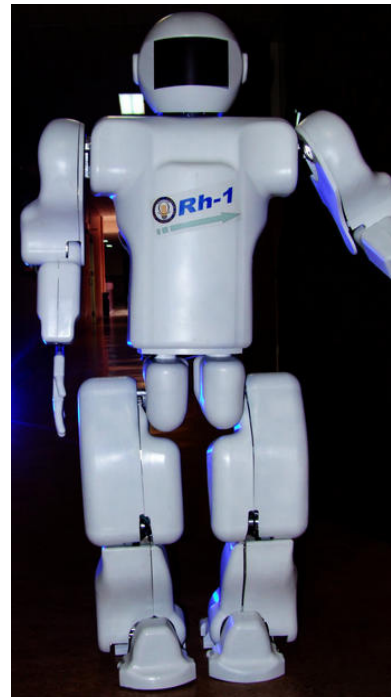
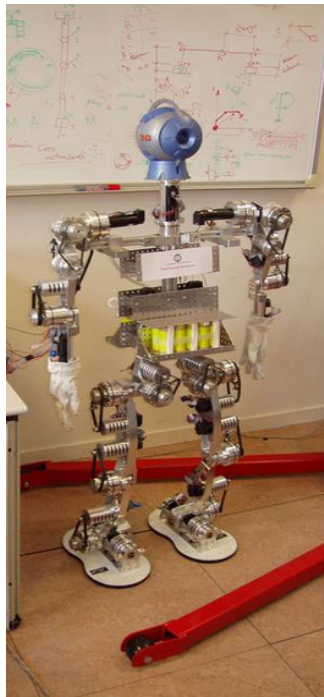


Figura 2.2.11 Robot Rh-0 y Rh-1 de la UC3M.

CAPITULO III: EL ROBOT PASIBOT

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ROBOT PASIBOT

El robot Pasibot fue ideado, diseñado y fabricado por los miembros del laboratorio MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid. Este robot bípedo es el centro de estudio de este proyecto de fin de carrera. Es un robot bípedo activo que une dos aspectos normalmente opuestos, lo simple y lo complejo. La simplicidad del robot viene dada por el movimiento generado por un único motor, que mediante una serie de mecanismos reductores y de transmisión de potencia consigue transmitir el movimiento al un robot bípedo.



Figura 3.1.1 El robot Pasibot

El uso de un motor, es decir un único movimiento para hacer mover todo el robot, supone que el resto de los componentes del robot Pasibot tengan que funcionar a la perfección para que se produzca el movimiento correcto. El hecho de tener un solo motor moviendo al robot también implica la necesidad de utilizar mecanismos que permitan traducir un único movimiento en todo un sistema que permita caminar al robot.

El conjunto mecánico del Pasibot consta de una gran cantidad de piezas, se han llegado a diseñar un total de 38 piezas distintas, alcanzando en total el robot una cantidad de 213 piezas.

Este número de piezas no es fijo ya que en el estudio del Pasibot se procede a la inclusión o exclusión de piezas con el objetivo de mejorar su funcionamiento y su rendimiento en los diferentes modelos que se han diseñado del robot. En definitiva, el modelo a analizar en este proyecto será el que consta del número de piezas antes mencionado. A continuación, se expondrá una tabla detallada en la que aparece el nombre de la pieza junto con la cantidad de piezas de la misma que se encuentran en el robot.

Tabla 3.1

Nombre	Número	Nombre	Número
PERONE	2	MOTOR	1
RODAMIENTOS	34	ENGRANAJE GRANDE	1
TIBIA	2	ENGRANAJE MEDIANO	1
RODILLA	1	ENGRANAJE PEQUEÑO	1
CONTRAFÉMUR	2	ENGRANAJE CON AGUJEROS	1
TENDÓN INFERIOR	2	EJE GRANDE	8
SEPARADOR	4	ROSCA MOTOR	8
FÉMUR	2	ROSCA BASE MOTOR	4
TENDÓN SUPERIOR	1	TUBOS CADERA	2
ESTABILIZADOR	1	DESLIZADERA	1
BIELA	2	ENGANCHE MOTOR	4
BALANCÍN	1	TUBOS ROSCADOS	1
MANIVELA	1	CADERA EXT. IZQUIERDA	1
PIE	2	CADERA INT. IZQUIERDA	1
ARANDELA	18	CADERA EXT. DERECHA	1
TORNILLO_16	6	CADERA INT. DERECHA	2
TORNILLO_21	8	CORREA	1
TORNILLO_27	4	CORREDELA	18
TORNILLO_38	4	RODAMIENTO EJE PRINCIPAL	1

Todos estos elementos pertenecen al prototipo del robot que está construido que está en la universidad. Mediante la unión de todos estos elementos se consigue construir el robot Pasibot, con el siguiente modo de funcionamiento.

Funcionamiento del mecanismo del Pasibot:

El funcionamiento del robot Pasibot se puede definir mediante el desarrollo de tres partes principales relacionadas con la transmisión de movimiento. Las tres partes de las que consta son:

- Chebyshev
- Extensión
- Estabilizador

3.1.1 MECANISMO DE CHEBYSHEV

Pafnuty Lvovich Chebyshev fue uno de los matemáticos más celebres del siglo XIX. Ruso de nacimiento, creó varias escuelas de pensamiento matemático en Rusia. A efectos de un resumen podemos clasificar los trabajos matemáticos de Chebyshev en las cuatro ramas siguientes: Mecanismos y Teoría de la Aproximación de Funciones, Teoría de los Números, Teoría de Probabilidades y Teoría de Integración.

Sin embargo escribió acerca de muchos otros temas: formas cuadráticas, construcción de mapas, cálculo geométrico de volúmenes, etc. Lo que nos interesa para explicar el funcionamiento del Pasibot será la rama de Mecanismos y Teoría de Aproximación de las Funciones [3].



Figura 3.1.2 Retrato de Chebyshev

El mecanismo de CHEBYSHEV consiste básicamente en un mecanismo biela-manivela. Este será el mecanismo principal del robot. Con este mecanismo conseguimos convertir el movimiento circular que nos aporta el motor en un movimiento trasnacional que consta de dos partes, una casi recta en la mitad de su ciclo y otro elíptico la otra mitad, es decir, describe una recta y media elipse.

El movimiento recto del punto de referencia corresponderá con el período durante el cual el pie este totalmente apoyado, mientras que el otro pie se encontrará en

el periodo de movimiento elíptico. El movimiento elíptico del pie que se encuentre en el aire hará que se desplace hacia delante hasta que se encuentre totalmente apoyado, momento en cual comenzará a soportar todo el peso del robot y comenzará el periodo de movimiento rectilíneo de su punto de referencia y, en consecuencia, el periodo de movimiento elíptico del otro pie.

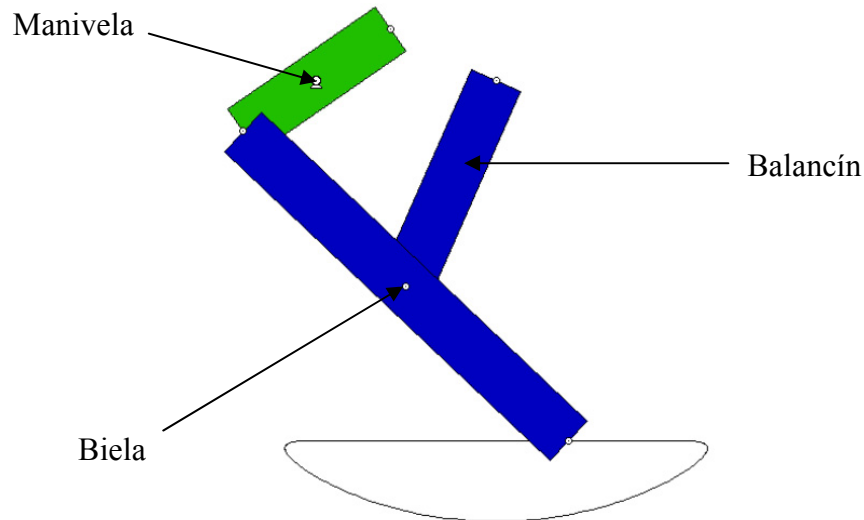


Figura 3.1.3 Movimiento del mecanismo Chebyshev

La manivela genera el movimiento circular, es la que se encuentra conectada al motor. El balancín está unido por un lado a la biela y por otro a la cadera. La biela es la que realiza el movimiento elíptico/rectilíneo gracias a su conexión con la manivela y el balancín.

3.1.2 EXTENSIÓN

Una vez realizado el movimiento del Chebyshev, se pasa al segundo movimiento que hace posible el funcionamiento del Pasibot, el pantógrafo (del Griego $\pi\alpha\nu\tau$, todo, y $\gamma\rho\alpha\phi$, dibujo, imagen), [4] que es un mecanismo articulado basado en las propiedades de los paralelogramos. Su teoría de funcionamiento fue descrita primero por Descartes y posteriormente por un jesuita llamado Christopher Scheiner teniendo múltiples utilidades. En la que nos centraremos es su utilidad en el campo del dibujo.

El funcionamiento del pantógrafo consiste en copiar una figura, o más bien reproducirla, a una escala distinta. El pantógrafo está compuesto por una serie de varillas unidas a un punto fijo denominado pivote sobre el cual se mueven.

Según la configuración de los elementos las escalas son variables, siendo necesario variar la distancia entre las rótulas, pero a condición de mantener el paralelismo entre varillas. La función de introducir el pantógrafo a continuación del Chebyshev es la de aumentar e invertir el movimiento creado por este último.

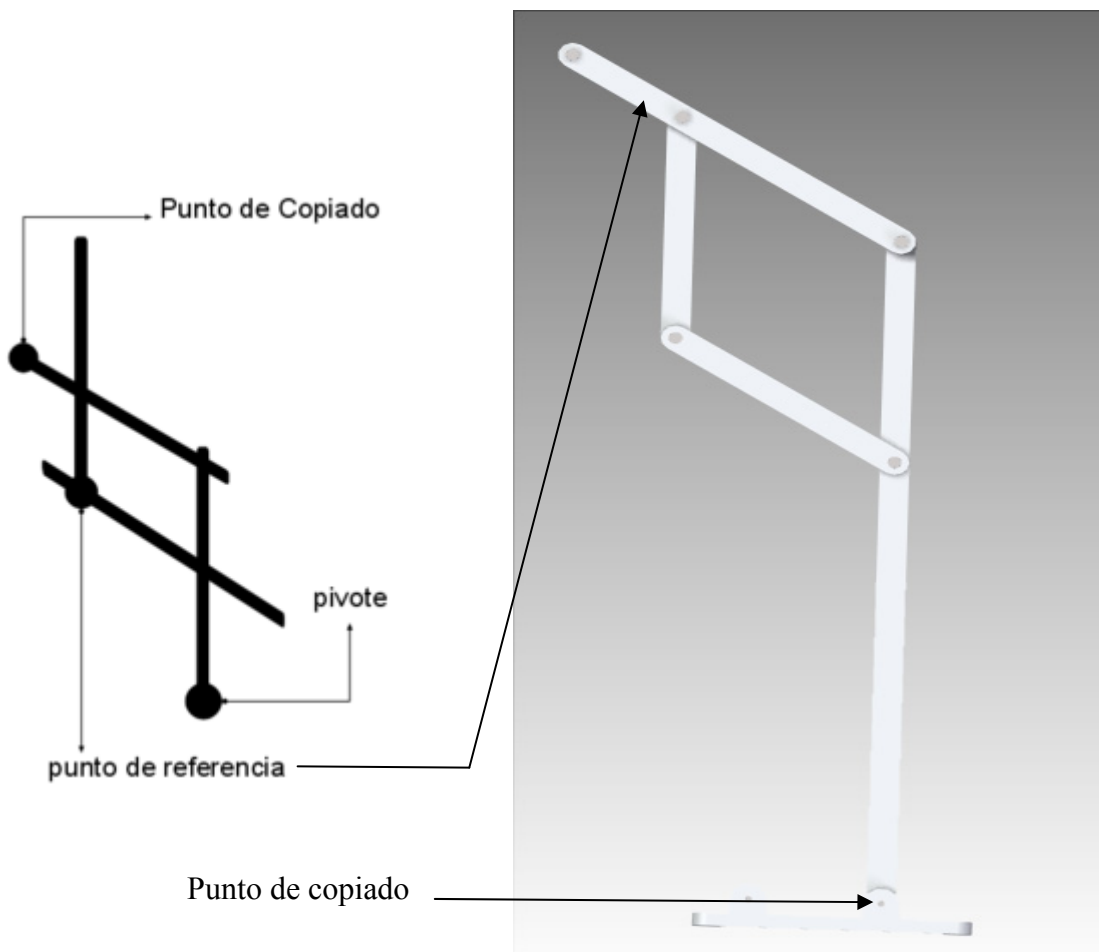


Figura 3.1.4 Esquema e imagen del pantógrafo

Las características más importantes de este sistema son:

- Los puntos A, M y B (indicados en la siguiente figura) siempre están alineados.
- Este mecanismo puede ser amplificador, reductor además de inversor.
- Si se fija el punto A y se mueve M se producirá una ampliación directa del movimiento reflejada en el punto B, mientras que si se mueve el punto B se producirá una reducción directa del movimiento en el punto M.
- Para invertir el movimiento se fija el punto M.

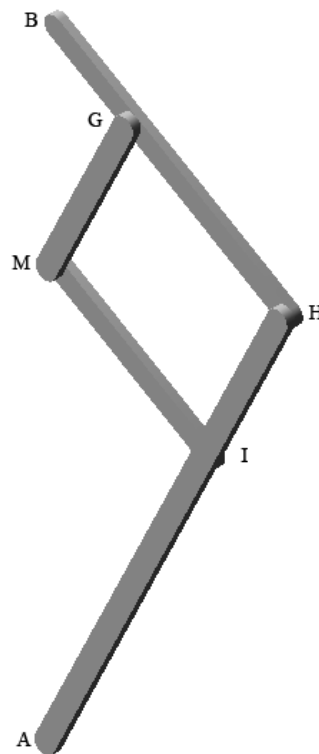


Figura 3.1.5 Pantógrafo

Con el conjunto de elementos introducidos, es decir, el Chebyshev y el pantógrafo conseguimos el movimiento necesario para hacer caminar al robot Pasibot. El sistema que se utiliza en nuestro robot es primero fijar el punto M para invertir el movimiento, y después inducirle el movimiento a B, que se verá amplificado en A. El sistema completo de Chebysev montado con el Pantógrafo lo podemos ver en la siguiente figura.

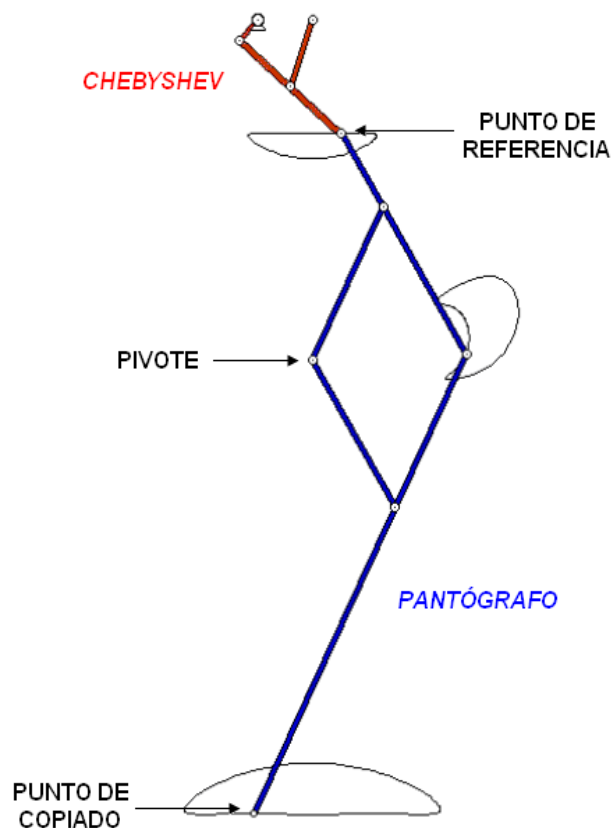


Figura 3.1.6 Mecanismo Chebysev y Pantógrafo unidos.

El problema reside en si el modelo es capaz de soportar el robot sin volcar. Esto supondría que el robot sea inestable, y que al cabo de cierto tiempo el robot vuelque. Este problema se puede solucionar mediante un sistema de estabilización.

3.1.3 ESTABILIZACIÓN

Para solucionar el problema de la inestabilidad del robot, y que no vuelque se utiliza el mecanismo de estabilización. Este es un mecanismo articulado, que está formado por cuatro elementos, que son:

- Peroné
- Contra-fémur
- Rodilla
- Estabilizador

Estos cuatro elementos aportan la solidez necesaria al robot, y obligan al pie a mantener una posición horizontal para un apoyo mucho más estable. Esto es posible gracias a que el estabilizador discurre por una corredera colocada en el lateral de la cadera, y que está alineada con el tramo recto del extremo de la biela de mecanismo Chebyshev. Gracias a ello estabilizador, rodilla y pie permanecen en una posición horizontal al estar alineados con la corredera.

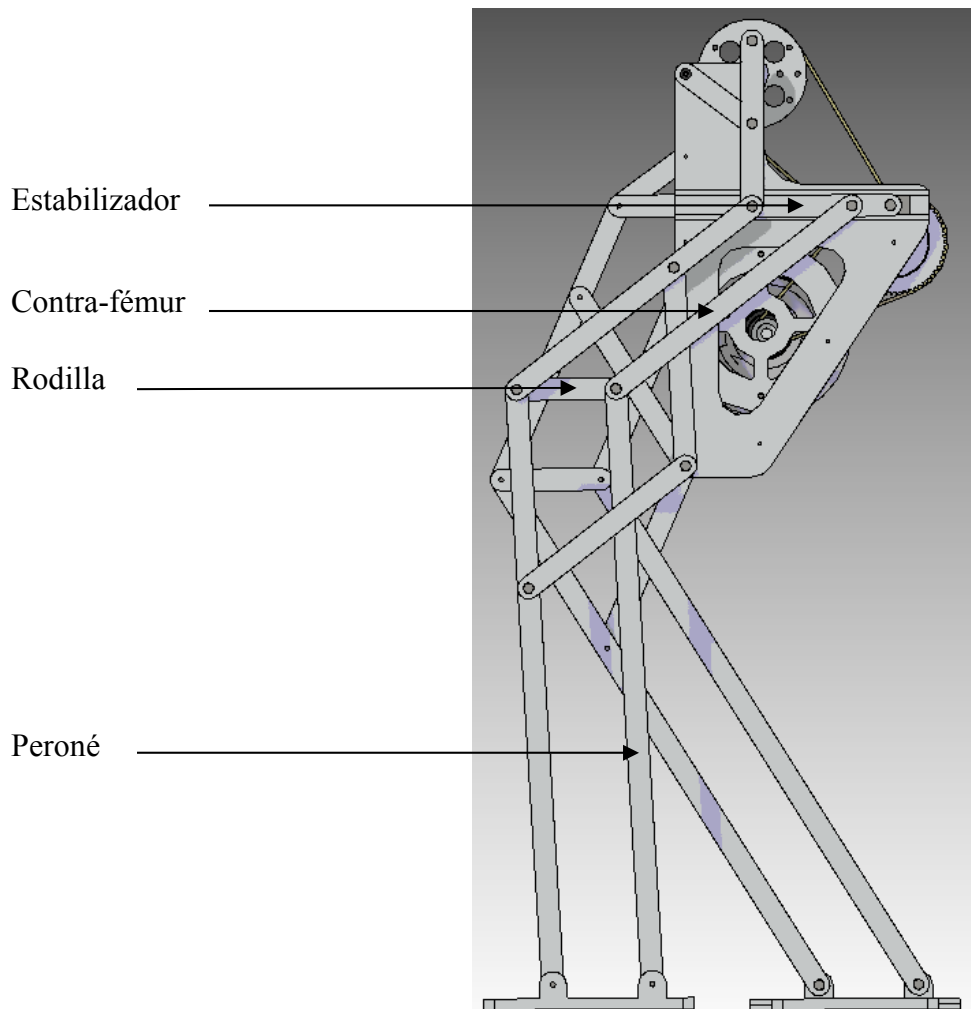


Figura 3.1.7 Elementos de estabilización

3.1.4 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El movimiento que permite caminar al robot se produce gracias al giro de un único motor eléctrico. Es necesario colocar un sistema reductor para así obtener el par deseado. Este sistema reductor está formado por dos correas y tres ruedas dentadas, que forman dos etapas en el sistema reductor.

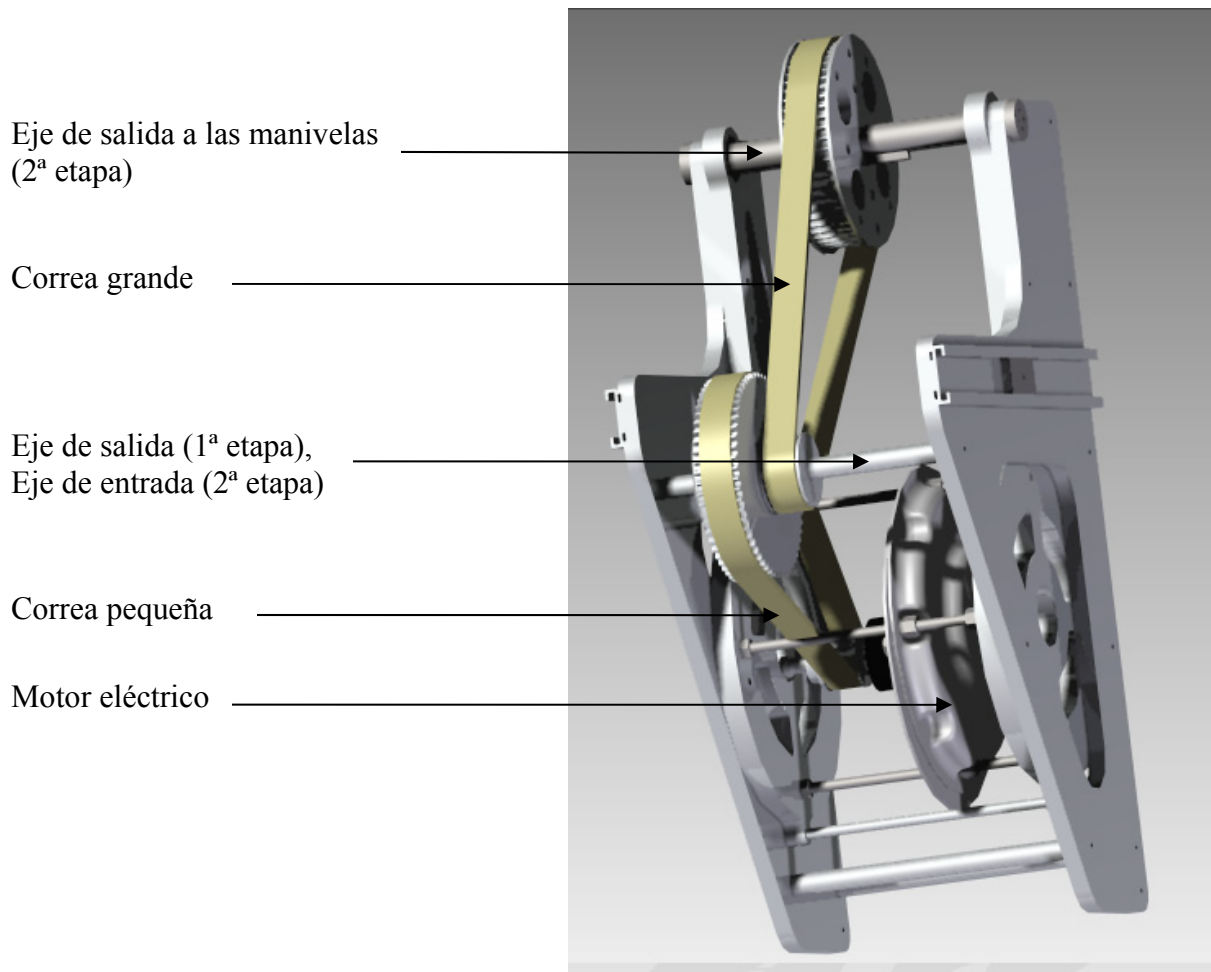


Figura 3.1.8 Elementos del sistema de transmisión

Dentro de este sistema de transmisión es por supuesto parte fundamental el motor, cuya información técnica podemos ver en el modelo marcado de los que aparecen en la hoja de características de la siguiente figura.



GP Series

PERFORMANCE DATA

TEST DETAIL			GPM SERIES MOTOR TEST RESULTS								GPN SERIES MOTOR TEST RESULTS					
MOTOR RATINGS	SYMBOL	UNIT	GPM9	GPM9LR	GPM12	GPM12LR	GPM16	GPM16LR	GPN9	GPN9LR	GPN12	GPN12LR	GPN16	GPN16LR		
Power	P	Watt	41	38.7	110	64	300	221	94	75	200	190	533	324		
Torque	T	Ncm	13.1	10	35	20	96	73	30	25	64	48	170	100		
Speed	N	rpm	3000	3705	3000	3050	3000	2905	3000	2887	3000	3810	3000	3102		
Voltage	V	Volt	14.5	9	23.5	12	43.3	24	22.5	12	37.5	24	75.8	36		
Current	I	Amp	6.9	11.7	7.6	10.8	9.3	13.4	6.85	11.4	7.3	11	8.4	11.7		
Continuous Stall Current	IS	Amp	4.5	6.5	5.0	6.5	6.0	8.0	4.5	6.5	5.0	7.0	5.7	8.0		

MOTOR CONSTANTS	SYMBOL	UNIT	GPM9	GPM9LR	GPM12	GPM12LR	GPM16	GPM16LR	GPN9	GPN9LR	GPN12	GPN12LR	GPN16	GPN16LR
Torque	Kt	Ncm/Amp	2.19	1.05	5.1	2.2	11.2	6.0	4.77	2.38	9.65	4.8	21.87	9.6
EMF	Ke	V/krpm	2.3	1.1	5.3	2.3	11.8	6.3	5.0	2.5	10.1	5.0	22.9	10
Damping	Kd	Ncm/krpm	0.3	0.3	0.59	0.56	0.99	1.0	0.5	0.3	1.2	0.7	2.5	2.5
Friction Torque	Tf	Ncm	1.2	1.2	2.0	2.0	4.9	4.9	1.2	1.2	2.0	2.0	4.9	4.9
Terminal Resistance @5A	Rm	Ohms	1.1	0.42	1.0	0.45	0.85	0.425	1.1	0.42	1.0	0.45	0.85	0.425
Total Inertia	J	kg.cm ²	0.388	0.388	1.624	1.624	6.284	6.284	0.388	0.388	1.624	1.624	6.284	6.284

PERFORMANCE CHARACTERISTICS AND DATA

For more information visit our website www.pmlflightlink.com. Precise figures will be qualified upon receipt of customer's specific application requirements.

DIMENSION GUIDES

* All variations
All dimensions in mm. All weights in kg.

MOTOR TYPE	A	B	C	D	E	F	G	H	Wt
GP*9	120	5.992/5.987	30.2	11.7	4.7	110	26	19.05	0.59
GP*12*	152.4	9.995/9.982	53	28.5	5.8	142	32	34.3	1.22
GP*16*	215.1	11.988/11.976	60	32.5	7.1	200	35.6	45.72	2.9

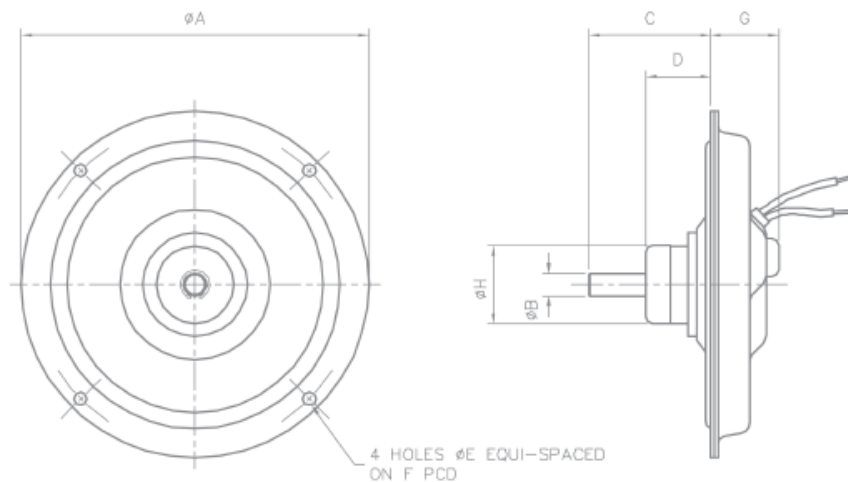


Figura 3.1.9 Características técnicas del motor eléctrico

3.2 MODELO FABRICADO

El robot Pasibot, del cual ya hemos explicado su funcionamiento y los elementos en los que se basa, tiene un prototipo real. Como era de esperar este prototipo construido es imperfecto y tiene múltiples fallos, que suponen que no sea capaz de andar con normalidad al requerimiento que le queramos dar. Esta es una de las razones para el gran número de proyectos basados en este robot, intentar analizar el comportamiento, los posibles fallos y las mejoras que se le pueden hacer al robot.

Para la fabricación del robot se usó como material sobre todo el aluminio, debido a sus buenas características mecánicas. Hay elementos del robot que están fabricados de otros materiales, como son el motor, las correas, los tornillos y los rodamientos.

Todas las piezas que conforman el robot Pasibot, a excepción del motor, los rodamientos, las correas y los tornillos, fueron fabricadas en aluminio. La elección de este material se debe a las excelentes propiedades mecánicas que posee. Es necesario para el diseño en la simulación del robot conocer los valores de las propiedades del material que se pretende simular, en nuestro caso el aluminio, y son las siguientes:

Tabla 3.2

Propiedad	Valor
Calor específico	897 J/KgK
Coefficiente de expansión térmica	0,0045 1/K
Coefficiente de Poisson	0,33
Conductividad térmica	209,3 W/mK
Densidad	2.712 Kg/m ³
Elongación	0,0
Límite elástico	27,579 MPa
Módulo de Young	6.8947,57 Mpa
Tensión de rotura	68,948 Mpa

Sin embargo a la hora de realizar las simulaciones necesitamos implementar el robot en el programa informático y a partir de ahí realizar la simulación, y para ello no será necesario incluir todos los elementos que componen el robot, ya que algunos no aportarán gran información, y supondrán una mayor dificultad. En el siguiente punto vemos el modelo simplificado.

3.3 MODELO SIMPLIFICADO

Como ya hemos comentado anteriormente es necesario eliminar algunas de las piezas que conforman al robot debido a las limitaciones de las herramientas utilizadas. Esto es debido a que algunos de los elementos del robot original no suponen información sustancial a la hora de realizar la simulación.

Sin embargo estos elementos y las uniones necesarias a realizar entre ellos y otros elementos, supone un gran aumento de las ecuaciones a resolver por el programa. Algunos de estos elementos eliminados son los tornillos, los rodamientos o las arandelas. En la siguiente figura (simplificada para la pierna derecha, tendría los mismos elementos en el lado izquierdo) vemos los elementos que se han mantenido para realizar la simulación.

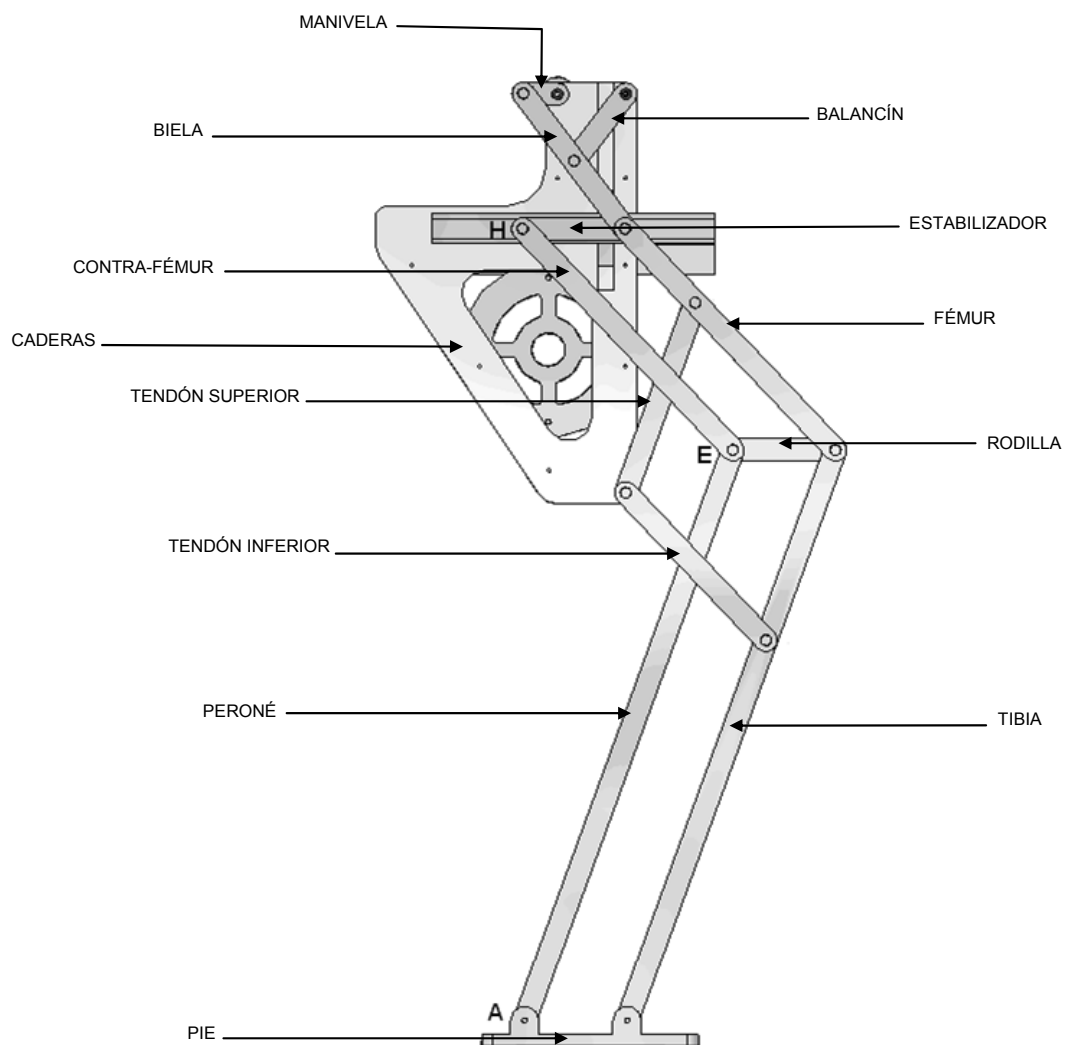


Figura 3.2.1 Pasibot simplificado

Como podemos ver en la anterior figura el robot ha quedado reducido en su número de piezas hasta llegar al aspecto de la figura 3.10. Los elementos que lo componen tanto para la pierna derecha como para la izquierda son:

- Balancín
- Biela
- Caderas
- Contra-fémur
- Estabilizador
- Fémur
- Manivela
- Peroné
- Pie
- Rodilla
- Tendón inferior
- Tendón superior
- Tibia

Todos estos elementos aparecen por duplicado al haber dos piernas en el robot simulado, excepto la cadera que se toma como un único elemento. Todos ellos tendrán una forma similar tipo barra con diferente longitud. También hay alguno con una forma distinta, como son los pies y las caderas. En las siguientes figuras vemos algunos ejemplos de estos elementos.

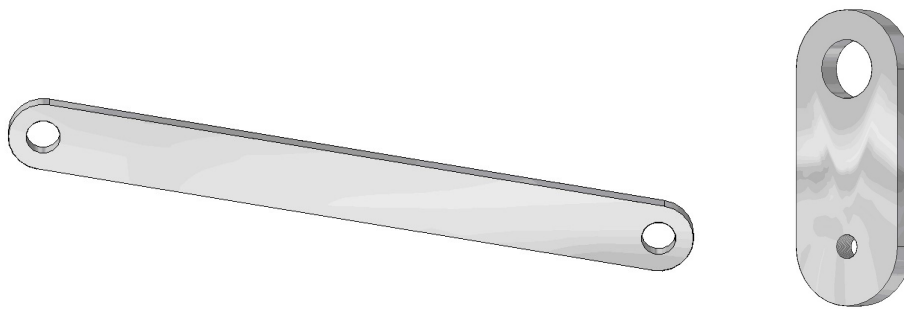


Figura 3.2.2 Tendón inferior y manivela

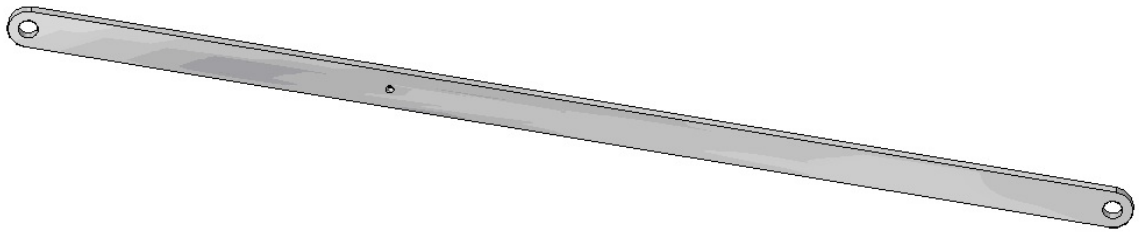


Figura 3.2.3 Tibia

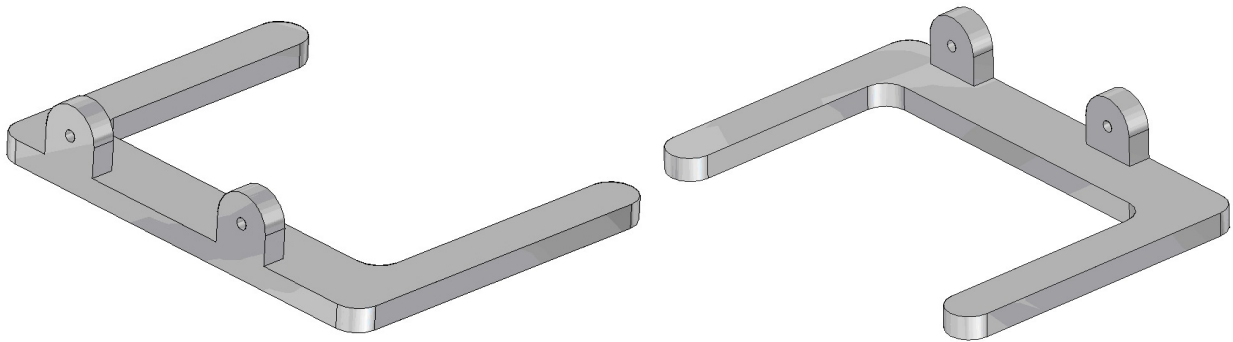


Figura 3.2.4 Pies derecho e izquierdo

A pesar de la gran similitud entre el robot real y el diseñado en el programa existen algunas diferencias debidas a las posibilidades que ofrece el programa de simulación. La diferencia fundamental radica en cómo darle movimiento al robot simulando un motor, cuando en el programa eso no es posible.

Lo que se hizo en el diseño del robot en el programa fue a través de diversas juntas (*joints*) darle movimiento a una de las piernas por medio de la manivela, y “unir” la otra manivela para recibir movimiento también.

En las siguientes imágenes podemos ver la situación de estas juntas en la geometría del robot, y así será más fácil hacernos una idea de su situación y de los requisitos que cumplen en el funcionamiento del robot en el programa de simulación.

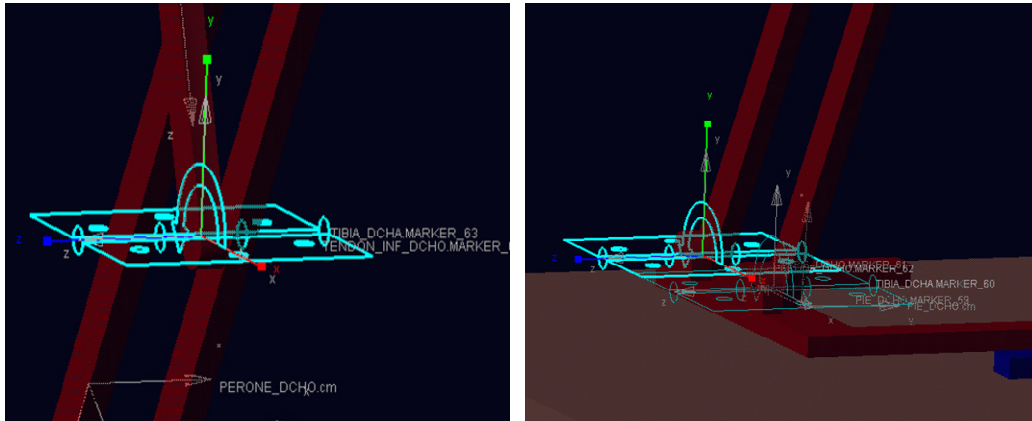


Figura 3.2.5 Imagen de juntas de revolución

Los elementos que componen el robot y que permiten su caminar vienen unidos mediante juntas, de éstas la mayoría son de revolución. Por medio de estas juntas fijamos un elemento a otro, y tendrán restringido su movimiento excepto para el giro relativo entre ambas alrededor de un eje. Éste eje será el que atraviese al marker seleccionado para situar la junta. Para hacer esto hacemos uso de las relaciones asociativas dadas por el programa de simulación, tales como:

- Hacer coincidir



Garantiza que una cara plana de la pieza entrante sea coincidente con la cara plana de otra pieza ya existente, manteniendo el paralelismo entre ellas.

- Alineación axial



Garantiza que una superficie cilíndrica de la pieza entrante sea coaxial con otra de la pieza existente.



JUNTA DE ROTACIÓN:

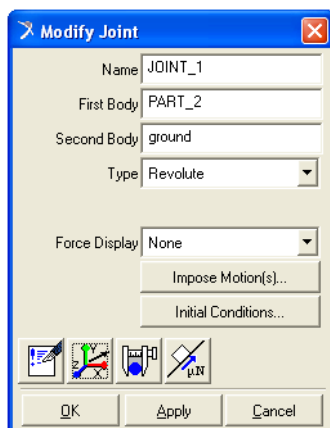


Figura 3.15 Menú junta de rotación

Restringe el totalmente el movimiento de traslación y la rotación en dos direcciones, permitiendo por tanto la rotación en una sola dirección. La dirección de rotación es, por defecto, normal a la malla, si está activada, o perpendicular a la vista seleccionada en ese momento si está desactivada. Si se desea modificar pulsaremos con el botón derecho en modificar y aparecerá el siguiente menú:

En este menú se podrá redefinir los sólidos que componen la junta, el tipo de junta, si deseamos aplicar una fuerza, realizar medidas, desplazar o girarla o incluso

Los elementos que están resaltados en la figura son las dos manivelas, la derecha en color magenta, y la izquierda de color amarillo. Vemos también el actuador y la junta fija, que son quiénes consiguen darle movimiento a las dos piernas del robot.

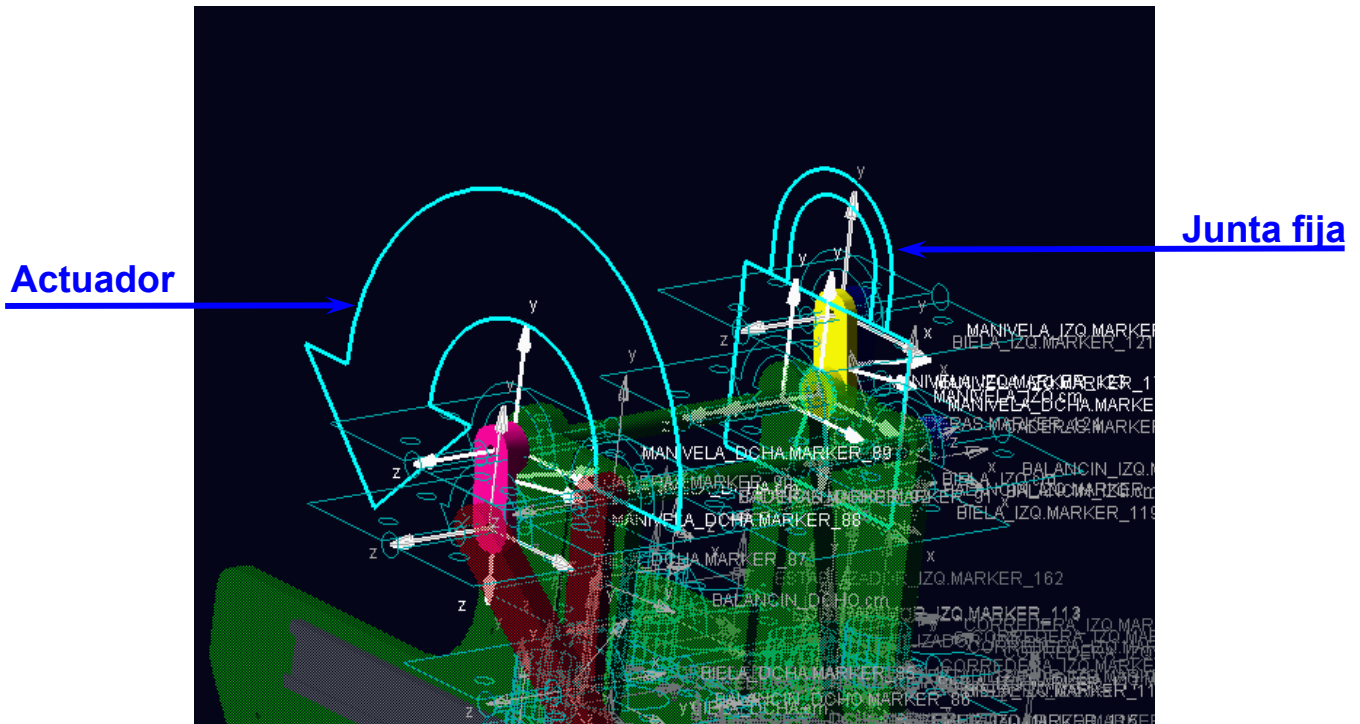


Figura 3.2.6 Junta y actuador necesarios para el movimiento de ambas piernas

Actuador:

El actuador es un motor rotativo que realiza el trabajo que haría el motor eléctrico en la realidad. Es un movimiento de revolución que hace que la manivela derecha gire alrededor del eje de revolución de la junta 17, que es quién une a la manivela derecha con la cadera.

Junta fija:

La junta fija restringe el movimiento de tal manera que anula todos los grados de libertad de un sólido respecto de otro. En nuestro caso hace que se mueva del mismo modo que la manivela, es decir, que la manivela izquierda es arrastrada por la manivela derecha.

Esto supondrá algunas peculiaridades en parámetros del Marker 89, que como veremos posteriormente está situado en la manivela derecha en su punto de unión con la cadera. Esto lo veremos con más detenimiento en el apartado de Análisis de resultados.

Modificaciones del robot diseñado:

La modificación que vamos a explicar a continuación fue realizada en el proyecto de fin de carrera realizado previo al mío por Javier Pérez. Las siguientes figuras han sido tomadas de su proyecto.

En el modelo del robot que hemos tomado para simular existen algunas modificaciones con respecto al original y a anteriores versiones del robot para simular. La modificación fundamental es la corredera en forma de T. Para ello se ha colocado una guía vertical que permita el movimiento vertical de la corredera.

Permite al elemento estabilizador moverse no sólo en dirección horizontal, como en anteriores versiones, si no que permite que también se mueva en dirección vertical, lo que aumenta la estabilidad del robot, y la naturalidad al andar del mismo.

En las siguientes figuras podemos ver primero la situación de la doble corredera, y las diferentes posiciones que ocupa durante el movimiento de caminar del robot Pasibot.

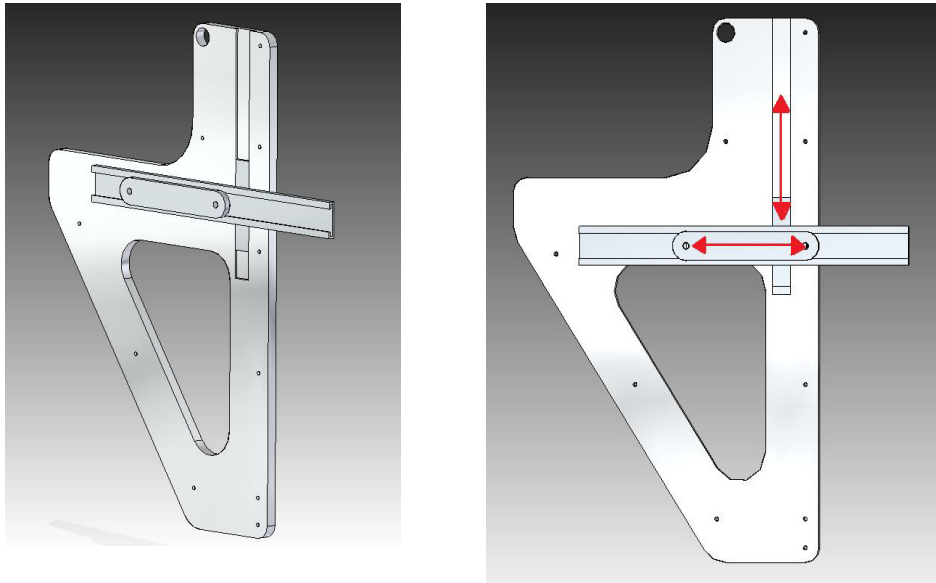


Figura 3.2.7 Nueva guía para la corredera

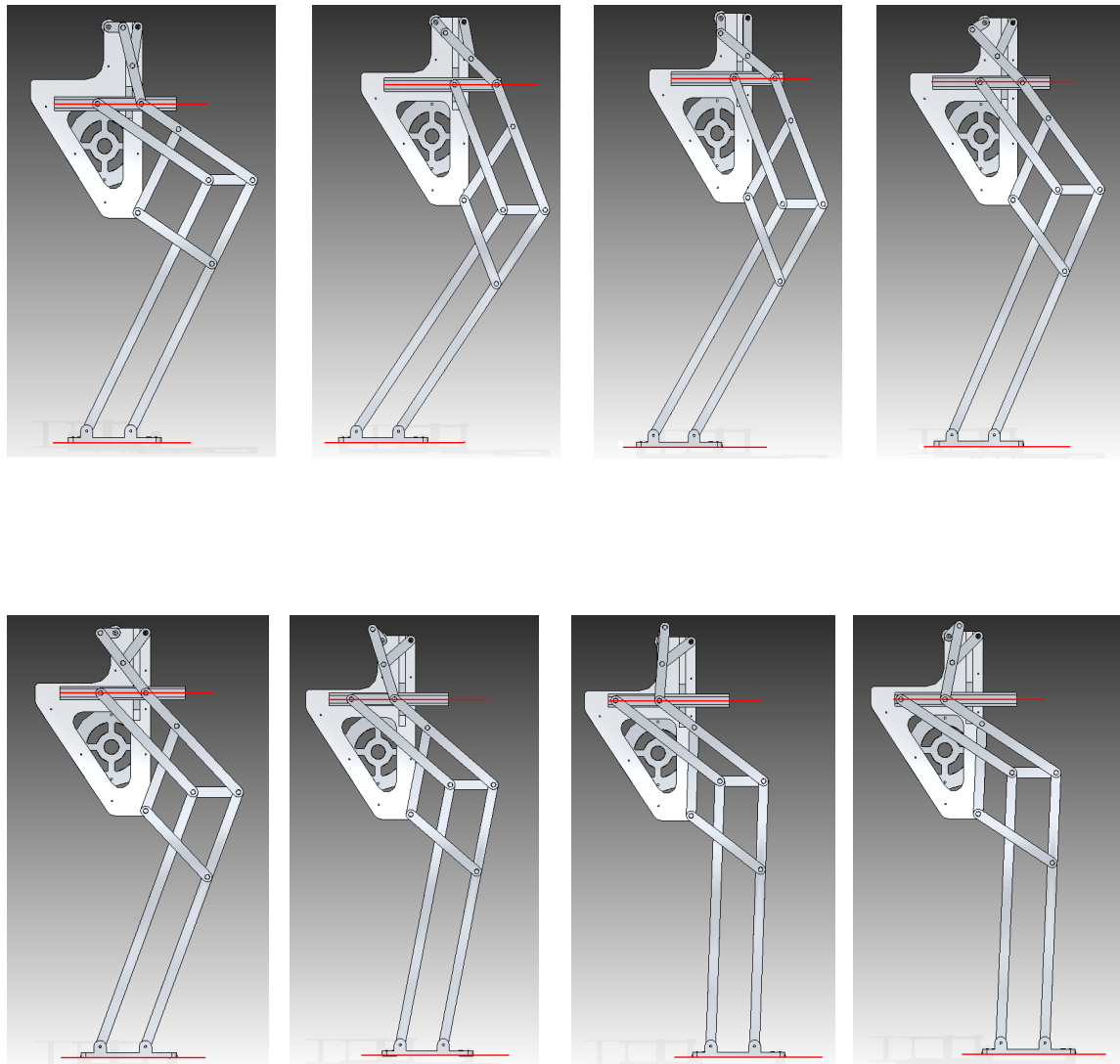


Figura 3.2.8 Trayectoria de la corredera y estabilizador con la nueva guía

CAPITULO IV: DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para el diseño de los elementos mecánicos del Pasibot se ha empleado una herramienta de diseño CAD, es decir, Diseño Asistido por Ordenador. La herramienta elegida es el **Solid Edge ST**, donde ST significa Tecnología Sincrónica. Esta versión del Solid Edge está evolucionada con respecto a las anteriores mejorando la plataforma de trabajo y las posibles modificaciones posteriores. Ateniéndonos a la explicación del fabricante exponemos lo siguiente: “Solid Edge® with Synchronous Technology es una versión innovadora que ofrece un nuevo paradigma de modelado que combina la velocidad y la flexibilidad del modelado explícito con el control y la previsibilidad del diseño parametrizado” [5].



Figura 4.1.1 Imagen inicial de arranque del programa Solid Edge ST

La ventaja de esta versión es que permite modificar dinámicamente un sólido importado sin el tener que pasar por la laboriosa tarea de modificar los bocetos de las operaciones que lo han generado. La evolución de este programa ha surgido de la necesidad de los diseñadores, esto facilita los procesos de poder editar, modificar y personalizar cualquier diseño de CAD con dicho software, independientemente de la persona que lo diseñó, cómo lo hizo y de con qué sistema CAD fue creado el diseño.

En la siguiente figura se puede apreciar las mejoras y el ámbito de trabajo que abarca esta nueva evolución del Solid Edge.

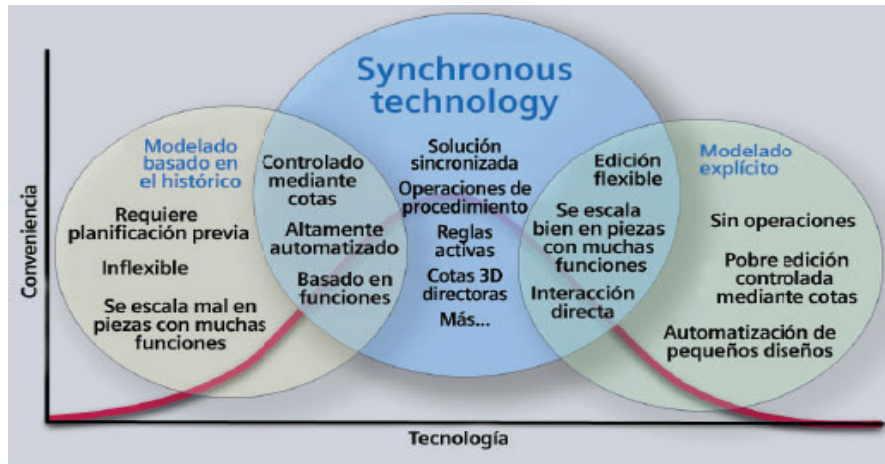


Figura 4.1.2 Gráfica explicativa de lo que aporta la tecnología síncrona.

En definitiva, para el diseño de las piezas la siguiente imagen dejará más claro la forma en la que se ha desarrollado el proceso.

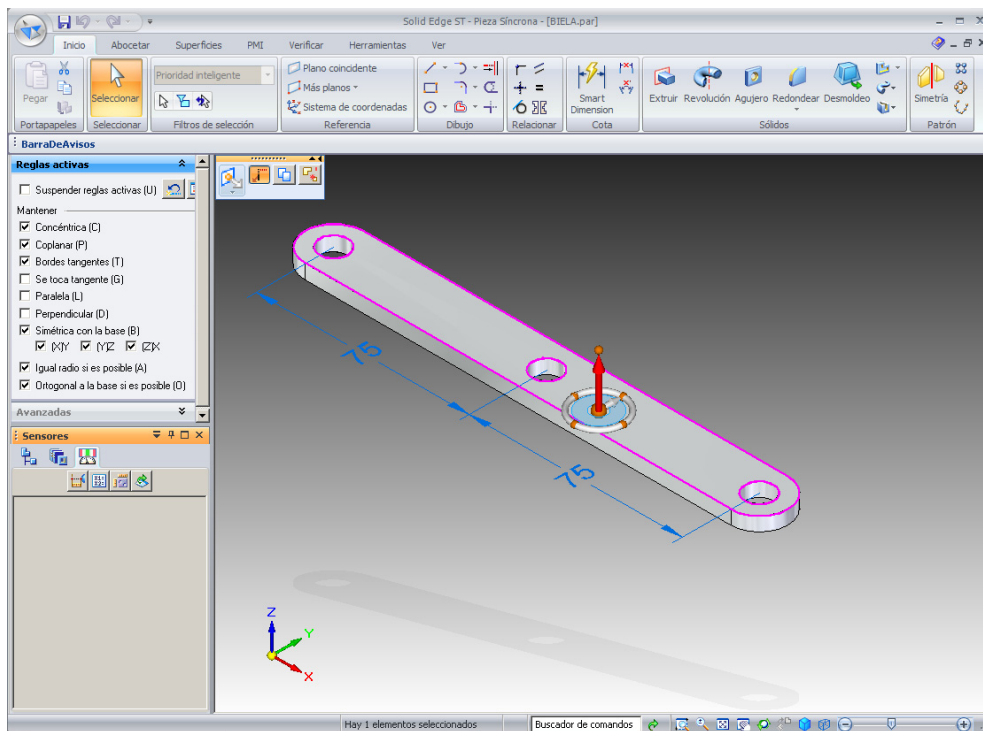


Figura 4.1.3. Vista del diseño de un elemento del Pasibot en Solid Edge.

Una vez diseñado el modelo y montado es necesario pasar a simular su funcionamiento dinámico. Este proceso no se puede realizar con la herramienta antes definida Solid Edge ST. Para este proceso hay que introducir una nueva herramienta de trabajo en el ámbito del análisis. La herramienta elegida es el programa **MSC ADAMS**. Según el fabricante: “Adams es el software de análisis de movimiento y dinámica multi-corporal mas utilizado en el mundo. Adams ayuda a los ingenieros a estudiar la

dinámica de partes en movimientos, estudiar como las cargas y las fuerzas están distribuidas a través del sistema mecánico y ayuda a mejorar y optimizar el funcionamiento de sus productos” [6].

MSC ADAMS es un soporte que facilita la modificación de sistemas mecánicos sin tener que pasar por el largo y caro proceso de hacer prototipos e ir probándolos. A diferencia de la mayoría de los programas CAD, ADAMS es capaz de resolver ecuaciones de manera instantánea para: cinemática, estática, cuasi-estática y dinámica, gracias a las ecuaciones de la física que utiliza. No obstante, no es perfecto y produce errores, a veces de manera continua, debido a que a través de estas ecuaciones de la física está intentando simular la realidad. No obstante, los resultados son más que aceptables y muy útiles para modificar el desarrollo de nuestro elemento mecánico.

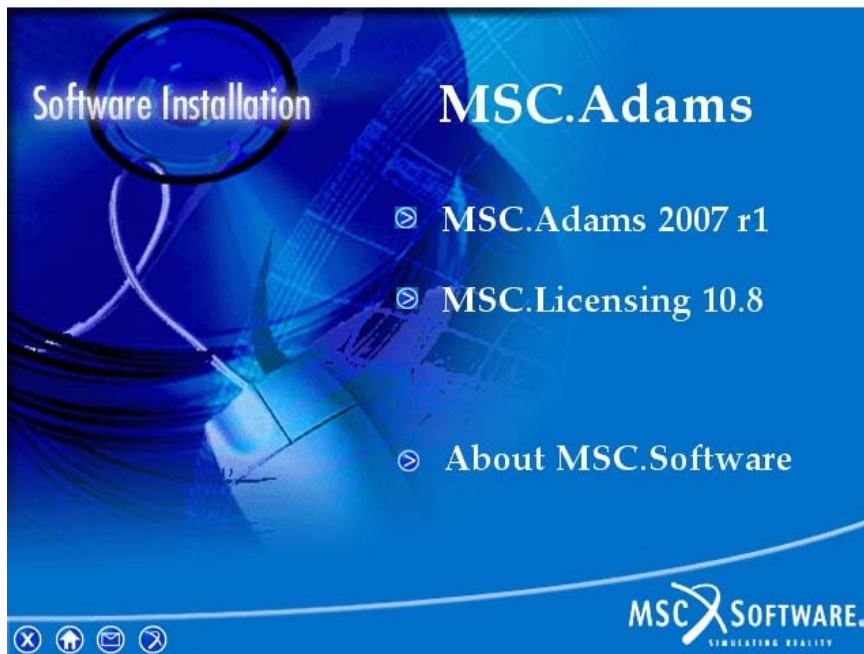


Figura 4.1.4 Imagen inicial del programa MSC ADAMS

4.1.1 PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño se ha realizado con la utilización de la herramienta CAD antes mencionada. Como la misión de este proyecto no ha sido la de diseñar ni la de modificar los elementos del modelo existente del Pasibot, no entraremos demasiado en detalle en el proceso de diseño. Lo que haremos será mencionar los procesos realizados en el diseño con Solid Edge ST.

Para modelar un conjunto mecánico como el que estamos tratando, el Pasibot, es necesario ir haciendo el diseño por partes. En otras palabras, no puedes dibujar todo el robot, sino que se va diseñando pieza por pieza para posteriormente ir las ensamblando en un conjunto de piezas que nos da el producto final, el Pasibot ya montado. De hecho, haremos simplemente una lista de los comandos más utilizados, en realidad, utilizados para aproximadamente el 95% de las piezas.

- Se selecciona la pieza ISO Síncrona en la ventana de inicio del programa.
- Especificar el plano del dibujo.
- Utilizando los comandos de dibujo localizados en la barra de herramientas, proceder a dibujar el boceto deseado.
- Extrusión de la región abocetada.
- Procesos a realizar una vez está hecha la pieza.
 - Activar el comando agujero, y realizar un agujero en la zona deseada.
 - Realizar un vaciado.
 - Elección del material.

Una vez que se han realizado todas las piezas, vaciados, extrusiones, etc. se puede proceder a unir las piezas y crear subconjuntos. Los subconjuntos a su vez se unen formando el conjunto final. Es de especial interés la destreza a la hora de hacer las uniones, esto se debe a que una unión imperfecta implicará una gran cantidad de errores a la hora de exportar el conjunto del soporte de diseño al soporte de análisis. Para evitar estos problemas se ha procedido a realizar dos tipos de diseño. Uno de los diseños es el diseño completo del Pasibot, con todo lo que lleva. El segundo diseño es el denominado Pasibot simplificado.

La diferencia entre los modelos es escasa, únicamente que se han eliminado los elementos que causan problemas a la hora de exportar el conjunto. Por ejemplo, se eliminan los rodamientos, elementos de unión en las juntas y el motor se simula como una masa puntual que genera movimiento. A primera vista podría parecer que se está perdiendo veracidad en los cálculos al hacer estas modificaciones, pero en realidad, se está simplificando el proceso de cálculo mientras que se consigue una aproximación del 98% a la realidad, cifra más que aceptable.

Una vez realizado el modelo, pasamos a exportarlo a MSC ADAMS, nuestro software de análisis. Considerando que es la herramienta que más se ha utilizado en este proyecto, haremos un poco más de énfasis en el programa de análisis de lo que se ha hecho en el programa de diseño. La idea no es la de introducir un tutorial dentro del proyecto, sino solo la de enfatizar los elementos importantes con los que se ha trabajado e incluir algunas imágenes para que el lector pueda familiarizarse un poco más con el programa.

Para empezar a simular en MSC ADAMS es necesario empezar importando las piezas desde SOLID EDGE. No es posible importar el sistema entero ya que a la hora de interpretarlo el programa lo tomará como una única pieza. Por tanto, para proceder al montaje en MSC ADAMS, procederemos a importar pieza por pieza y luego montarla.

Para importar una pieza se utilizará el formato .igs, formato que es casi universal y según varias comprobaciones es el que menos problemas da. Para proceder a importar es necesario abrir la aplicación ADAMS/View y crear un modelo nuevo. Posteriormente se accede a la tecla de importar y se selecciona el archivo deseado, .igs en este caso. Accediendo al botón part name, se le da un nombre a la parte en cuestión, introduciendo un valor en el formato .model_Xpart_Y donde X e Y son números, aparte de esto es necesario también identificar la pieza con un Id en el cual pondremos el número de la parte.

Una vez hecho esto, se hace click en OK y ya se tiene la pieza creada. Es importante destacar la importancia de los ejes utilizados en el proceso de diseño, ya que en los dos programas, la notación de suelo es distinta. Para evitar el problema antes mencionado de que se importe como una única pieza en vez de cómo un elemento mecánico, el proceso idéntico pero con la extensión con la que lo debemos guardar será la de parasolid.x_t.

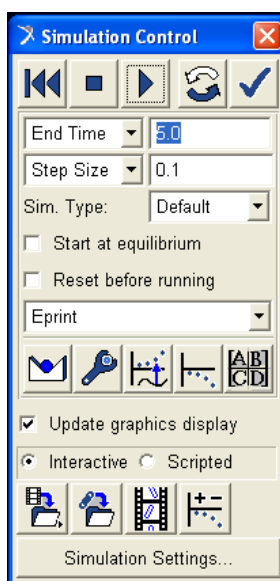


Figura 4.1.5 Control de la simulación

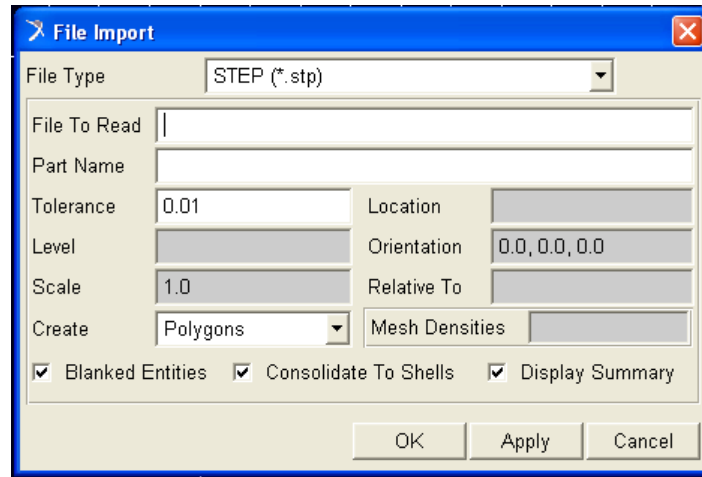


Figura 4.1.6 Importación de archivo

Una vez detallado el proceso de exportar las piezas desde SOLID EDGE a MSC ADAMS definiremos el proceso de hacer que se mueva el robot, en definitiva, hacer la simulación. Para ello nos vamos a la ventana activa por defecto denominada MAIN TOOLBOX, hay que pinchar en el icono de INTERACTIVE SIMULATION CONTROLS y ampliar la ventana.



haciendo click sobre este botón nos aparece la siguiente figura:

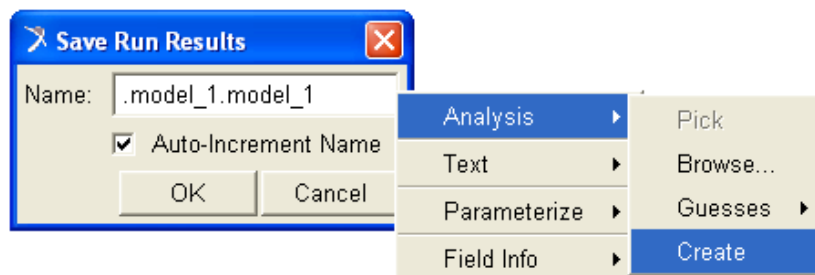


Figura 4.1.7 Interactive simulation controls

Haciendo el proceso anterior aparecerá una ventana como la que sigue. El nombre se debería cambiar para cada simulación ya que en caso de no hacerlo se irán sobrescribiendo una sobre la otra y perderemos la información deseada.

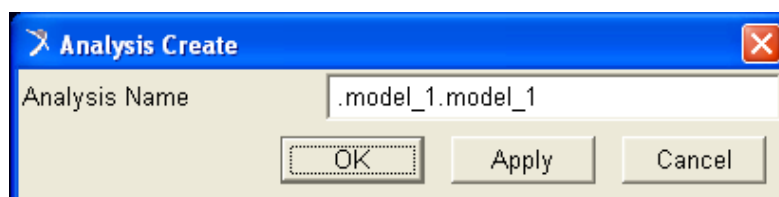
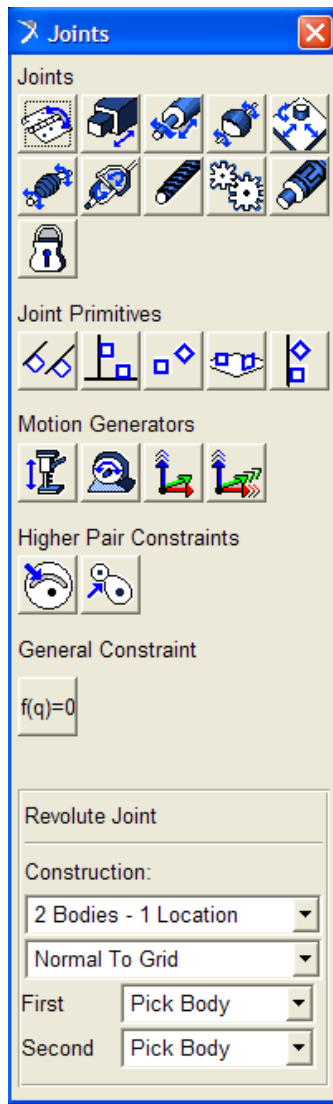


Figura 4.1.8 Analysis create



En la imagen de la izquierda podemos ver la barra de las juntas. Esta tabla se utiliza para darle el movimiento al robot. Como hemos comentado antes, el modelo simplificado no tiene el motor incluido, por tanto, lo que se hace es introducir un actuador del tipo motor rotativo a la velocidad deseada. Es quien proporciona el movimiento rotatorio que acciona la manivela y hace moverse al Pasibot.

DATOS DE LA SIMULACIÓN

Velocidad del estudio: $\omega = 95 \text{ }^\circ/\text{s}$

Número de pasos = 1000

Tiempo de simulación = 20 s

Todos estos parámetros son modificables según los requerimientos. Se ha procedido a 1000 pasos para tener medidas de sobra y los 20s para poder tener una cantidad suficiente de pasos, siempre es útil simular más de tres pasos.

Figura 4.1.9 Opciones de juntas

4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.2.1 CONDICIONES INICIALES

Como ya hemos comentado este es un proyecto basado en el análisis del robot bípedo Pasibot, para realizar la simulación necesaria y así poder obtener los datos deseados, es fundamental conocer las condiciones de inicio del robot.

Estas condiciones dependiendo de su origen quedan agrupadas y explicadas en:

- **Geométricas:**

En esta primera parte situaremos la posición original del robot, así como su localización en los tres ejes espaciales. En la siguiente figura vemos la posición inicial del robot. El robot camina sobre una plataforma que se ha diseñado con material de acero.

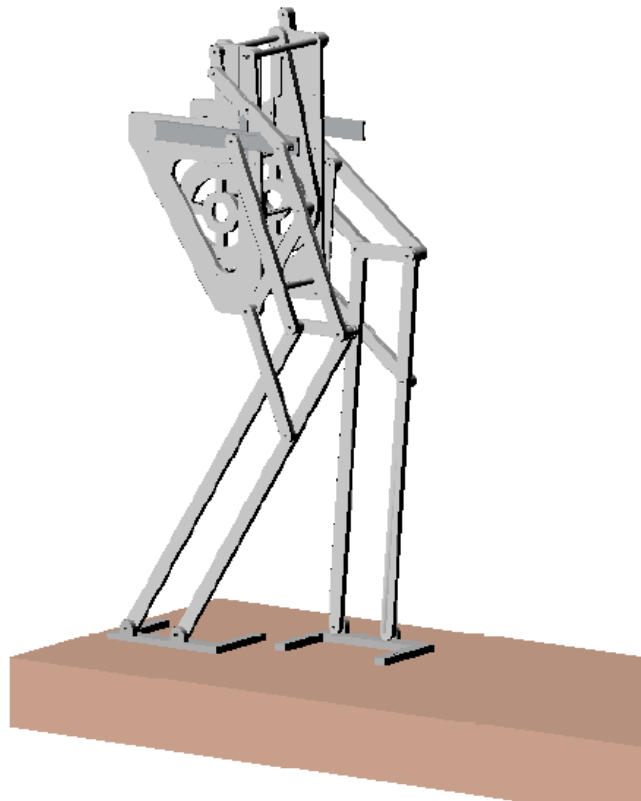


Figura 4.2.1 Pasibot en posición inicial

Como podemos ver en la figura en la posición inicial del robot el pie izquierdo está adelantado, mientras que el derecho está más retrasado. Esto significa que el pie derecho será el que comience el proceso de caminar dando el primer paso. El pie

izquierdo se mantendrá apoyado en el suelo, siendo el único apoyo del robot mientras el pie derecho avanza hasta adelantar la posición del pie izquierdo y apoyar también en el suelo, con lo que los dos pies estarían apoyados en el suelo en ese momento.

En las siguientes figuras podemos ver la dirección de los tres ejes espaciales.

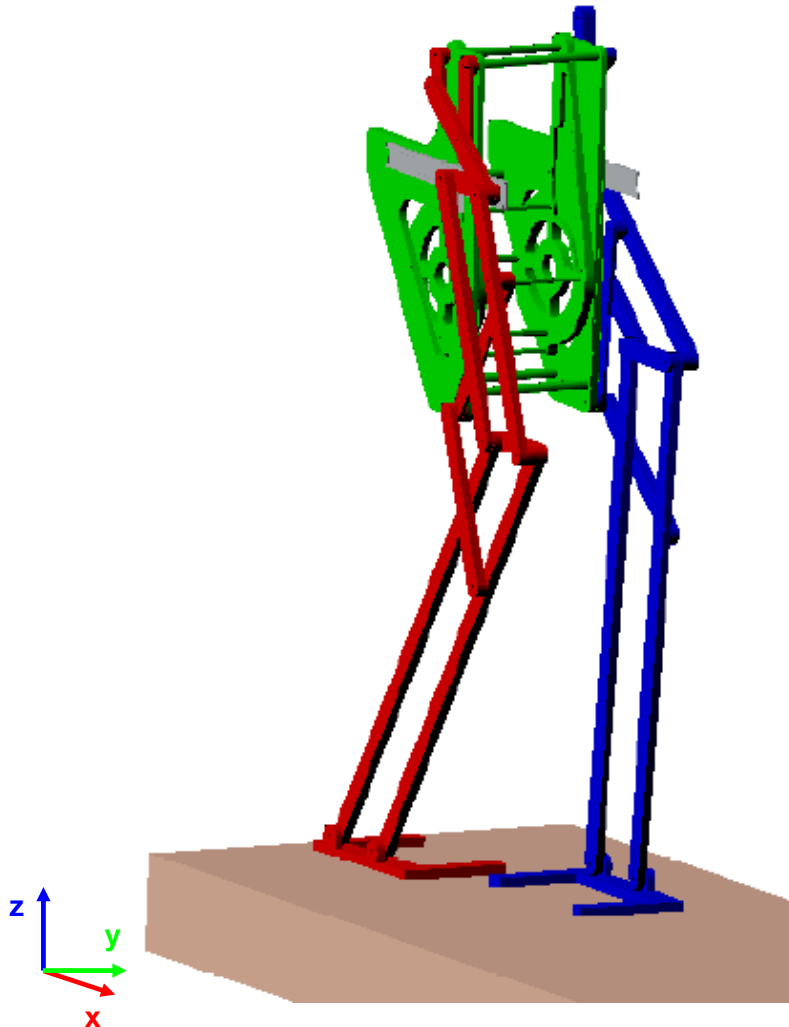


Figura 4.2.2 Pasibot en posición inicial con ejes cartesianos

El origen de coordenadas está situado en un punto distinto al de la Figura 4.2.2. Se ha mantenido para el presente proyecto la posición del origen de coordenadas establecida en su momento por el compañero que implementó el robot Pasibot. La posición del origen de coordenadas está situada en la cara exterior del lado izquierdo del elemento cadera. En las Figuras 4.2.3. y 4.2.4 podemos ver la posición del origen de coordenadas y el robot en su posición de origen antes de comenzar el movimiento.

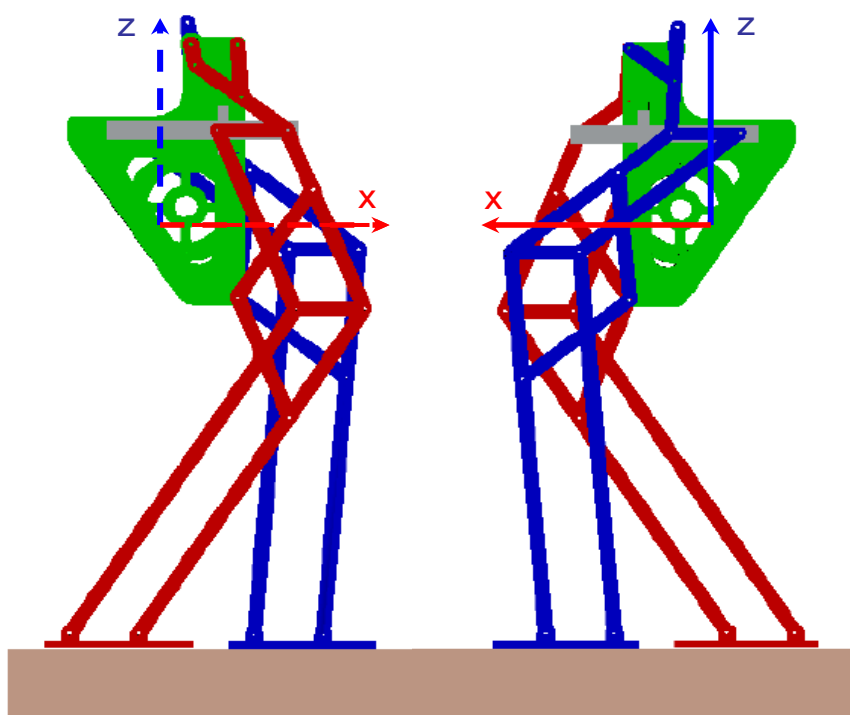


Figura 4.2.3 Vista lateral derecha e izquierda del robot Pasibot en la simulación

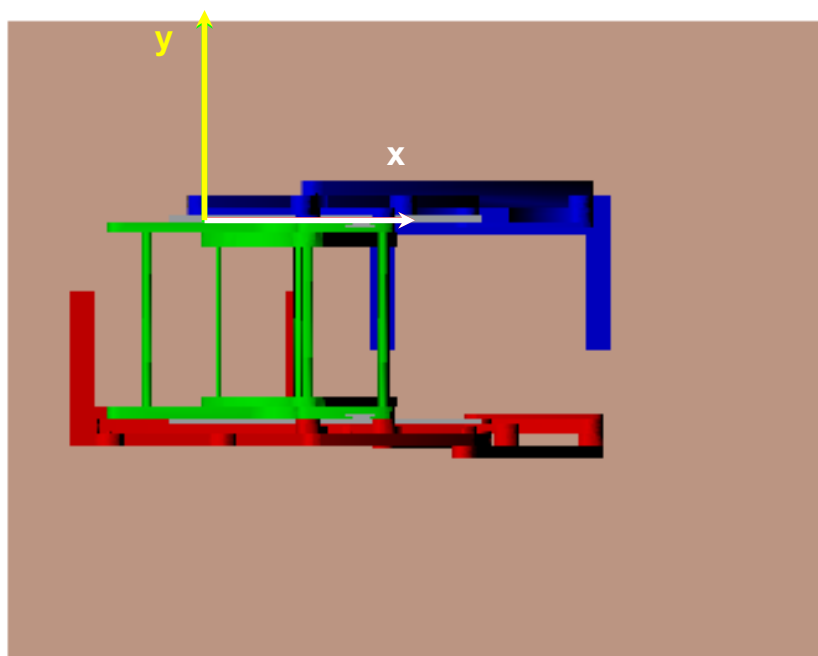


Figura 4.2.4 Vista superior del robot Pasibot en la simulación

Como se puede apreciar en las figuras el robot va a caminar sobre una plataforma colocada en el plano XY. Y se moverá en dirección del eje Y con sentido positivo.

- **Físicas:**

Las características físicas del robot vendrán determinadas por el valor que se le dio a cada uno de los parámetros a la hora del diseño de cada uno de los elementos. En la siguiente tabla podemos ver el valor de estas características.

Tabla 4.1

Característica	Valor
Densidad	$2740 \text{ Kg} / \text{m}^3$
Módulo de Young	$7,17 \times 10^4 \text{ MPa}$
Coefficiente de Poisson	0,33

- **Cinemáticas:**

Dentro del apartado de características cinemáticas es fundamental señalar la velocidad de giro indicada al robot para nuestra simulación, pues será el parámetro que rijan el movimiento de los elementos del robot en la simulación.

Tabla 4.2

Característica	Valor
Velocidad de giro del motor	95 deg/s

- **Dinámicas:**

En este apartado de características el parámetro a señalar y situar es la fuerza gravitatoria. Como podemos ver en la figura se ha colocado esta fuerza en la dirección del eje Z con sentido negativo. También vemos los coeficientes de rozamiento entre el robot (en la simulación al igual que en la realidad está hecho de aluminio) y la plataforma sobre la que camina, que será acero.

Tabla 4.3

Característica	Valor
Fuerza gravitatoria	$\text{Masa del elemento} \times 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$
Coefficiente de rozamiento estático (μ_s) aluminio-acero	0,61
Coefficiente de rozamiento cinético (μ_k) aluminio-acero	0,47

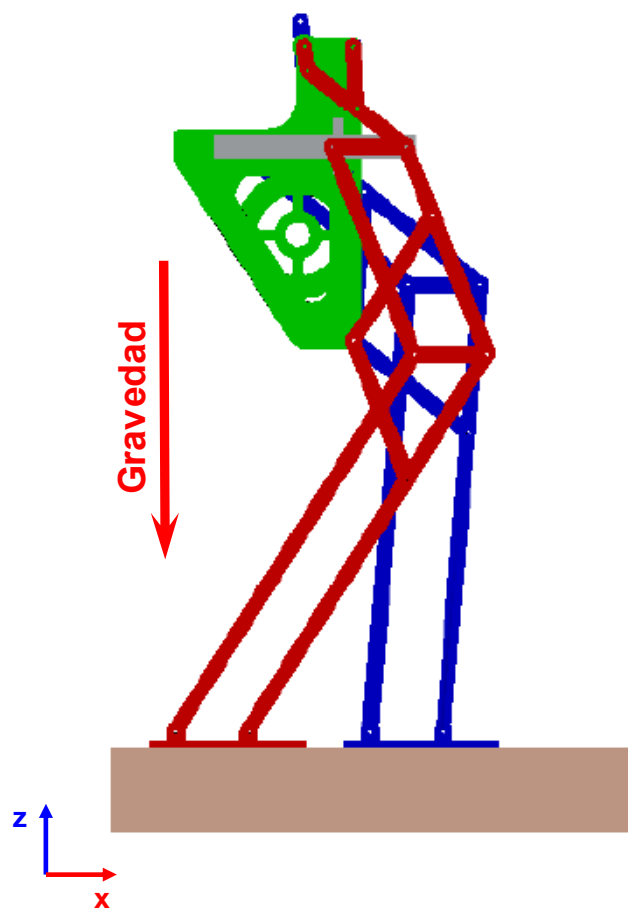


Figura 4.2.5 Dirección y sentido de la fuerza gravitatoria en la simulación

- **De simulación:**

Tabla 4.4

Característica	Valor
Tiempo de la simulación	20 segundos
Pasos de la simulación	1000 pasos

Nuevas simulaciones con distintas velocidades

Una vez realizada la primera simulación y habiendo tomado los datos necesarios de cada uno de los puntos que queríamos, lo siguiente será realizar nuevas simulaciones con diferentes velocidades de giro del motor. En estas nuevas simulaciones se tomarán datos de aquellos puntos que sean más importantes y significativos, ya sea por la

información que den con respecto al movimiento del robot o debido a sus exigencias dinámicas. Las nuevas velocidades las vemos en la siguiente tabla.

Tabla 4.5

Nuevas velocidades de giro del motor	
1ª Simulación	90 °/s
2ª Simulación	180 °/s
3ª Simulación	270 °/s
4ª Simulación	360 °/s
5ª Simulación	450 °/s

4.2.2 MARKERS Y LOCALIZACIÓN

Como ya hemos comentado, para la realización del proyecto hemos realizado diferentes simulaciones sobre el robot Pasibot para así apreciar la evolución del robot al caminar. He tomado datos de diferentes puntos en cada elemento para así poder determinar con más fiabilidad las condiciones finales de cada punto tras finalizar la simulación.

Estos puntos son los más significativos de los elementos. Debido a la morfología del tipo de elemento más predominante, la barra, estos puntos más significativos serán el centro de masas (CM), y los extremos de la barra. De cada uno de estos puntos de los elementos como ya hemos dicho tomamos datos de la aceleración angular, aceleración traslacional, movimiento traslacional, fuerza, momento, velocidad angular y velocidad traslacional. De cada uno de estos parámetros hemos tomado datos en los tres ejes espaciales X, Y y Z.

A continuación se explica los puntos elegidos para la toma de datos de la simulación y su ubicación especificando los markers que pertenecen a cada elemento.

Pierna derecha:

Tabla 4.6

Elemento	Puntos seleccionados
Balancín	CM, Markers 86 y 91
Biela	CM, Markers 82,83,85 y 87
Caderas	CM, Marker 76, 90, y 92
Contra-fémur	CM, Markers 69 y 79
Estabilizador	CM, Markers 80 y 84
Fémur	CM, Markers 65, 78 y 81
Manivela	CM, Markers 88 y 89
Peroné	CM, Markers 62, 70 y 71
Pie	CM, Markers 59 y 61
Rodilla	CM, Markers 68 y 72
Tendón inferior	CM, Markers 64 y 73
Tendón superior	CM, Markers 74, 75 y 77
Tibia	CM, Markers 60,63,66 y 67

Cada uno de los markers se sitúa en el extremo de una de las barras. Sin embargo hay barras en las que hay más de dos markers, esto se debe a que al menos uno de los extremos de la barra está unido a más de una barra.

Es importante conocer la ubicación de cada marker dentro de su elemento, pero también a que otro elemento se encuentra unido como articulación, con lo que en la siguiente lista se explica la situación de los markers de cada elemento.

- Balancín:

- El marker 86 de este elemento está situado en la unión del balancín y la biela.
- El marker 91 está situado en la unión del balancín con las caderas.

- Biela:

- El marker 82 de la biela está situado en la unión de la biela y el fémur.
- El marker 83 está situado en la unión de la biela con el estabilizador.
- El marker 85 de la biela está situado en la unión de la biela con el balancín.
- El marker 87 de la biela está situado en la unión de la biela con la manivela.

- Caderas:

- El marker 76 está situado en la unión con el tendón superior.
- El marker 90 está situado en la unión con la manivela.
- El marker 92 está situado en la unión con el balancín.

- Contra-fémur:

- El marker 69 está situado en la unión con el peroné.
- El marker 79 está situado en la unión con el estabilizador.

- Estabilizador:

- El marker 80 está situado en la unión con el contra-fémur.
- El marker 84 está situado en la unión con la biela.

- Fémur:

- El marker 65 está situado en la unión con la tibia.
- El marker 78 está situado en la unión con el tendón superior.
- El marker 81 está situado en la unión la biela.

- Manivela:
 - El marker 88 está situado en la unión con la biela.
 - El marker 89 está situado en la unión con las caderas.
- Peroné:
 - El marker 62 está situado en la unión con el pie.
 - El marker 70 está situado en la unión con el contra-fémur.
 - El marker 71 está situado en la unión con la rodilla.
- Pie:
 - El marker 59 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 61 está situado en la unión con el peroné.
- Rodilla:
 - El marker 68 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 72 está situado en la unión con el peroné.
- Tendón inferior:
 - El marker 64 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 73 está situado en la unión con el tendón superior.
- Tendón superior:
 - El marker 74 está situado en la unión con el tendón inferior.
 - El marker 75 está situado en la unión con las caderas.
 - El marker 77 está situado en la unión con el fémur.
- Tibia:
 - El marker 60 está situado en la unión con el pie.
 - El marker 63 está situado en la unión con el tendón inferior.
 - El marker 66 está situado en la unión con el fémur.
 - El marker 67 está situado en la unión con la rodilla.

Para una mejor percepción de los markers de cada elemento y de los centros de masa de cada elemento se incluyen las dos siguientes figuras, en las que se sitúan cada uno de los markers de la pierna derecha así como la posición de los centros de masa de cada elemento.

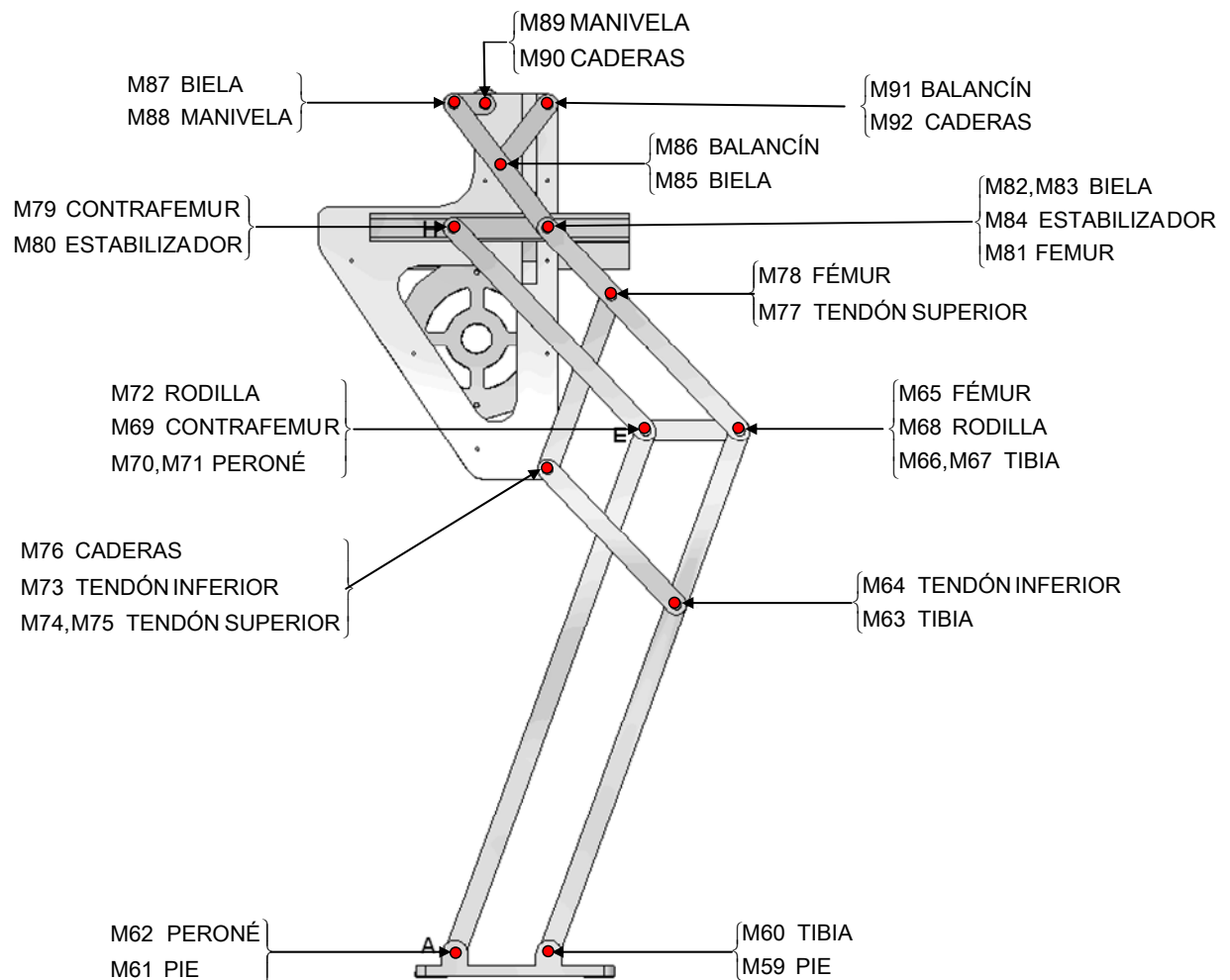


Figura 4.2.6 Localización de los markers de la pierna derecha

En esta primera figura vemos la posición de cada uno de los markers pertenecientes a cada uno de los elementos. Como ya he comentado antes hay varios elementos con más de un elemento en al menos uno de sus extremos. Esto es debido a que en estos elementos se da la circunstancia de que coinciden al menos tres elementos en un mismo punto de articulación.

En cuanto a la nomenclatura utilizada en la figura cabe señalar que M seguido de un número significa que en ese punto está situado el Marker con el número especificado. Al lado de cada marker se especifica el elemento al que pertenece.

La siguiente figura nos indica la posición de los centros de masa de cada elemento.

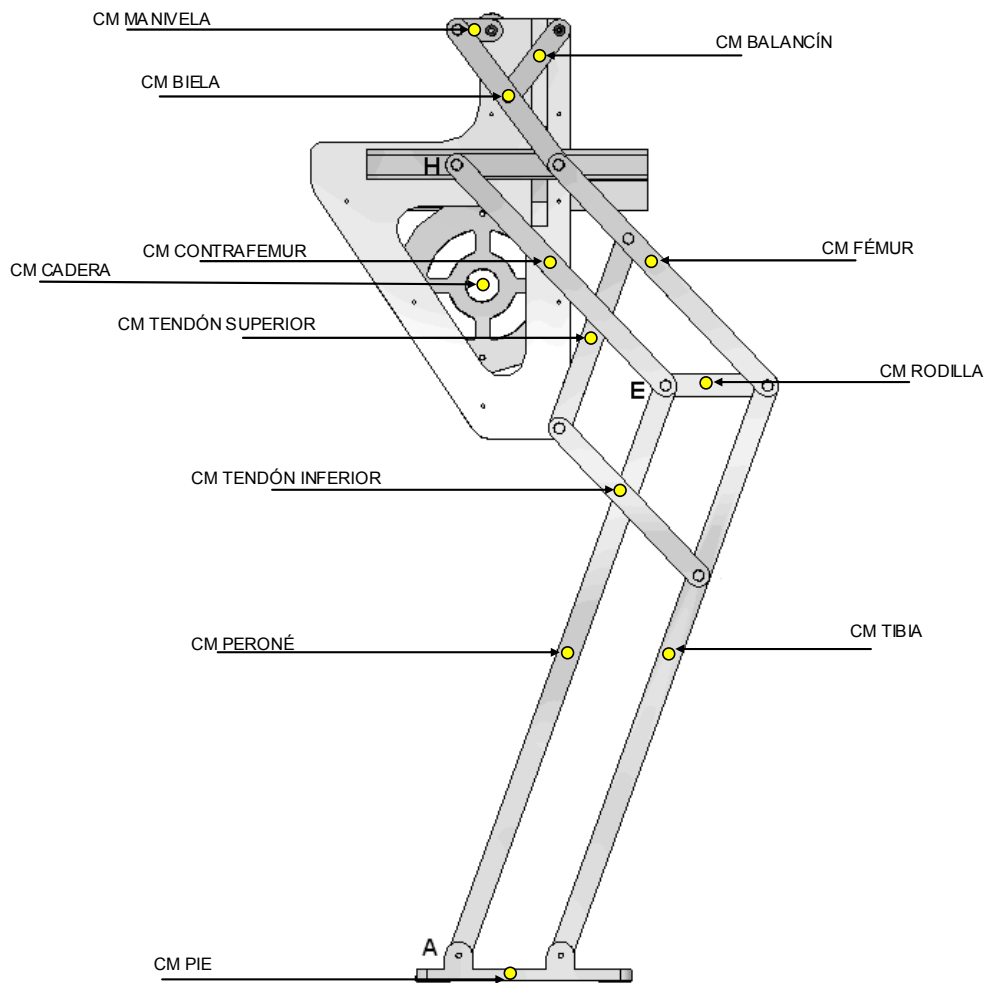


Figura 4.2.7 Localización de los centros de masa

Pierna izquierda:

De la misma manera que hemos definido los markers de la pierna derecha para cada elemento, tanto señalando el elemento al que pertenecen como la posición relativa que ocupan con respecto al elemento adyacente, lo haremos en la siguiente tabla con su lista explicativa correspondiente para la pierna izquierda.

También en esta pierna situaremos gráficamente cada uno de los markers y centros de masa de cada uno de los elementos que conforman el robot Pasibot en la simulación.

Tabla 4.7

Elemento	Puntos seleccionados
Balancín	CM, Markers 120 y 125
Biela	CM, Markers 116, 117, 119 y 121
Caderas	CM, Markers 110,124 Y 126
Contra-fémur	CM, Markers 103 y 113
Estabilizador	CM, Markers 114 y 118
Fémur	CM, Markers 99, 112 y 115
Manivela	CM, Marker 122 y 123
Peroné	CM, Markers 96, 104 y 105
Pie	CM, Markers 93 y 95
Rodilla	CM, Markers 102 y 106
Tendón inferior	CM, Markers 98 y 107
Tendón superior	CM, Markers 108, 109 y 111
Tibia	CM, Markers 94, 97, 100 y 101

La posición de cada marker dentro de su respectivo elemento es:

- Balancín:
 - El marker 120 de este elemento está situado en la unión del balancín y la biela.
 - El marker 125 está situado en la unión del balancín con las caderas.
- Biela:
 - El marker 116 de la biela está situado en la unión de la biela y el fémur.
 - El marker 117 está situado en la unión de la biela con el estabilizador.
 - El marker 119 de la biela está situado en la unión de la biela con el balancín.
 - El marker 121 de la biela está situado en la unión de la biela con la manivela.
- Caderas:
 - El marker 110 está situado en la unión con el tendón superior.
 - El marker 124 está situado en la unión con la manivela.
 - El marker 126 está situado en la unión con el balancín.

- Contra-fémur:
 - El marker 103 está situado en la unión con el peroné.
 - El marker 113 está situado en la unión con el estabilizador.
- Estabilizador:
 - El marker 114 está situado en la unión con el contra-fémur.
 - El marker 118 está situado en la unión con la biela.
- Fémur:
 - El marker 99 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 112 está situado en la unión el tendón superior.
 - El marker 115 está situado en la unión la biela.
- Manivela:
 - El marker 122 está situado en la unión con la biela.
 - El marker 123 está situado en la unión con las caderas.
- Peroné:
 - El marker 96 está situado en la unión con el pie.
 - El marker 104 está situado en la unión con el contra-fémur.
 - El marker 105 está situado en la unión con la rodilla.
- Pie:
 - El marker 93 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 95 está situado en la unión con el peroné.
- Rodilla:
 - El marker 102 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 106 está situado en la unión con el peroné.
- Tendón inferior:
 - El marker 98 está situado en la unión con la tibia.
 - El marker 107 está situado en la unión con el tendón superior.

- Tendón superior:
 - El marker 108 está situado en la unión con el tendón inferior.
 - El marker 109 está situado en la unión con las caderas.
 - El marker 111 está situado en la unión con el fémur.
- Tibia:
 - El marker 94 está situado en la unión con el pie.
 - El marker 97 está situado en la unión con el tendón inferior.
 - El marker 100 está situado en la unión con el fémur.
 - El marker 101 está situado en la unión con la rodilla.

Del mismo modo que para la pierna derecha, en la siguiente figura podemos ver la localización de cada marker en el robot.

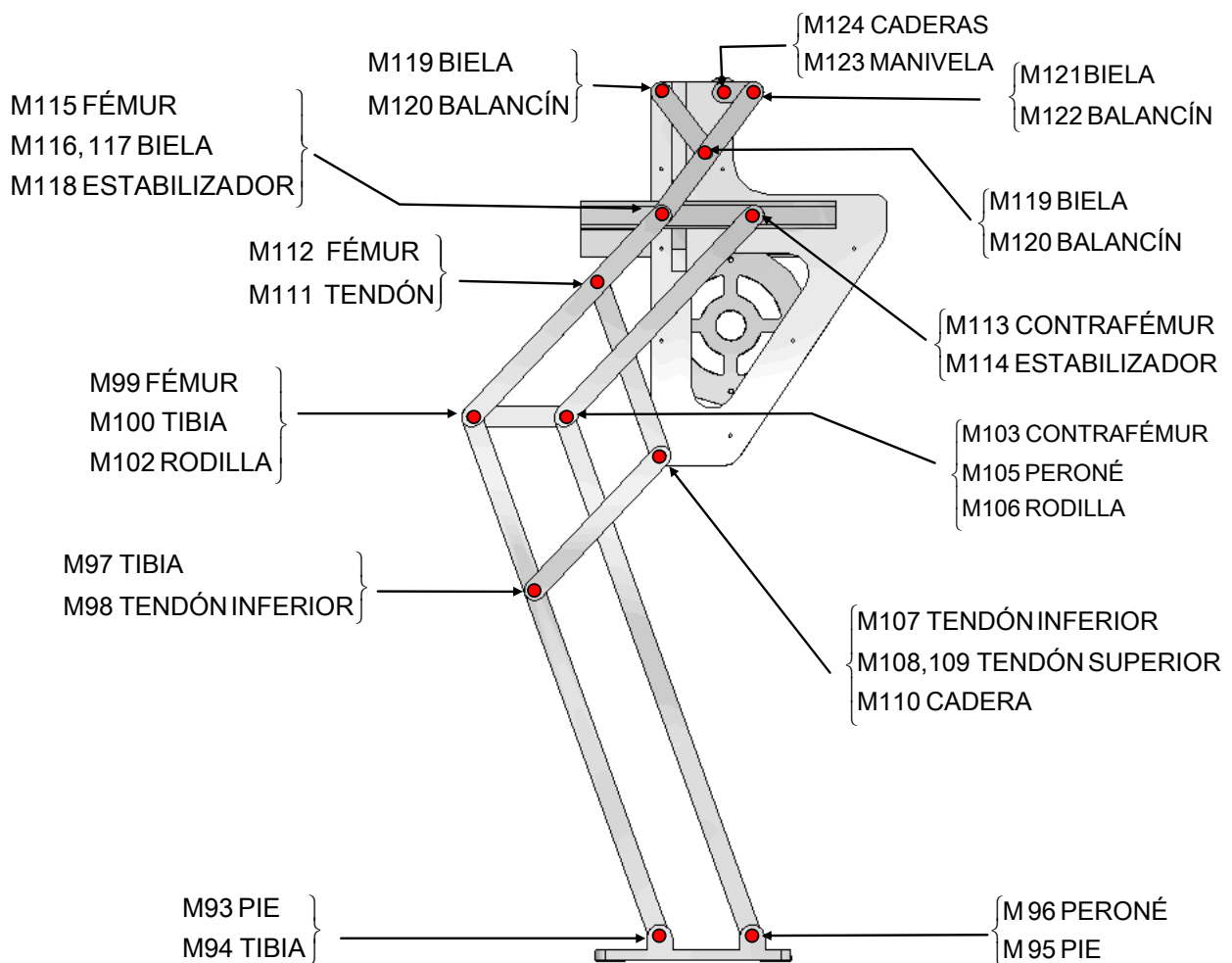


Figura 4.2.8 Localización de los markers de la pierna izquierda

Los centros de masas de cada uno de los elementos que conforman el robot Pasibot en la simulación para la pierna izquierda son los que aparecen en la siguiente figura.

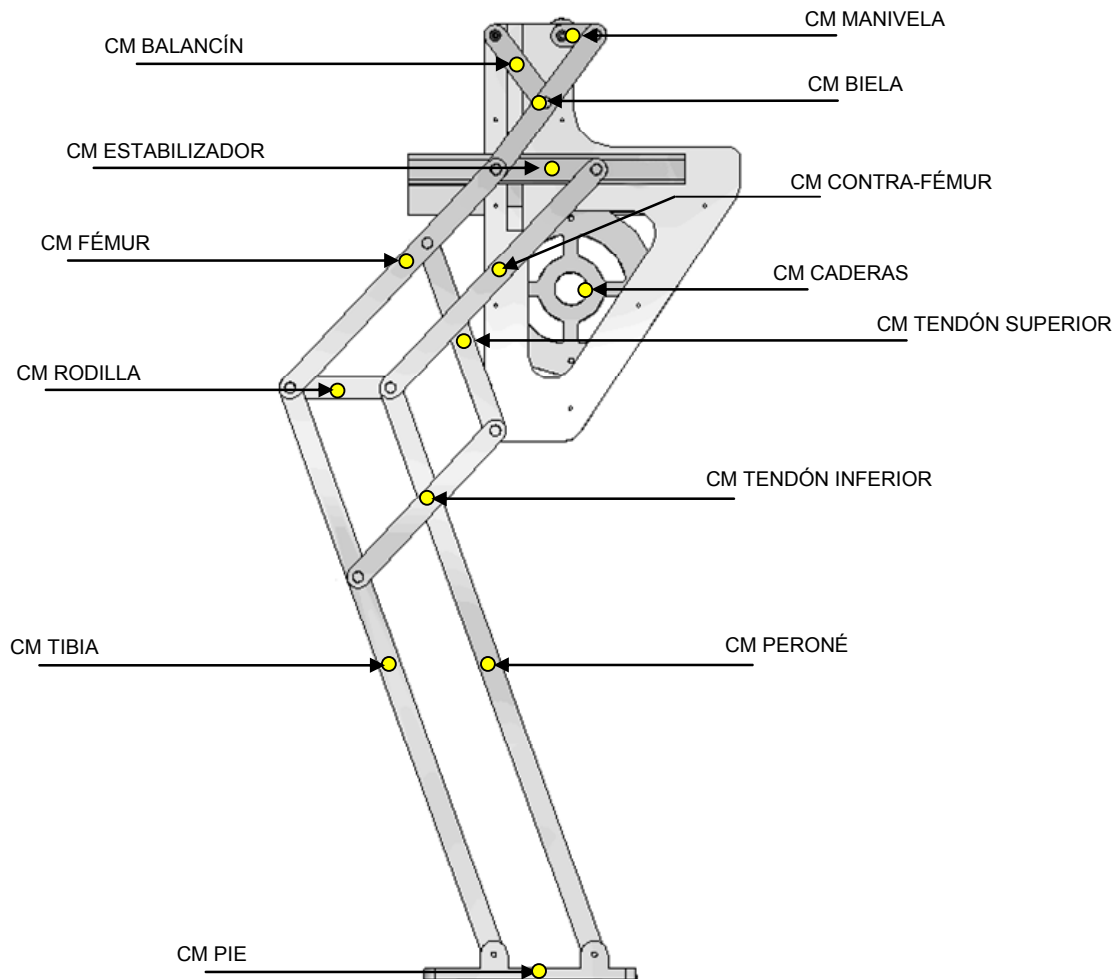


Figura 4.2.9 Localización de los centros de masa de la pierna izquierda

4.2.3 TOMA DE DATOS DE LA SIMULACIÓN

En este punto del proyecto vamos a explicar los parámetros de los que se tomaron datos en la simulación para cada uno de los elementos. Para ello deberemos diferenciar entre la toma de datos sobre los centros de masa de los elementos y los markers colocados para cada elemento.

Centros de masa:

Para cada uno de los centros de masa de cada uno de los elementos participantes en el modelo de la simulación hemos tomado datos de los siguientes parámetros:

- Movimiento traslacional. De cada uno de los centros de masa de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la posición del centro de masas para cada eje en cada instante de tiempo.
- Velocidad traslacional. De cada uno de los centros de masa de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la velocidad lineal con la que se mueve cada centro de masas en cada eje para cada instante de tiempo.
- Velocidad angular. De cada uno de los centros de masa de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la velocidad angular con la que se mueve cada centro de masas en cada eje para cada instante de tiempo. Medida en %s o deg/s (degree es grado en inglés).
- Aceleración traslacional. De cada uno de los centros de masa de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la evolución de la aceleración lineal de cada centro de masas en cada uno de los tres ejes para cada instante de tiempo.
- Aceleración angular. De cada uno de los centros de masa de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la evolución de la aceleración angular de cada centro de masas en cada uno de los tres ejes para cada instante de tiempo.

Marker de cada elemento:

- Movimiento traslacional. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la posición del marker correspondiente para cada eje en cada instante de tiempo.
- Velocidad traslacional. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la velocidad lineal con la que se mueve cada marker en cada eje para cada instante de tiempo.
- Velocidad angular. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la velocidad angular con la que se mueve marker en cada eje para cada instante de tiempo.
- Aceleración traslacional. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la evolución de la aceleración lineal de cada marker en cada uno de los tres ejes para cada instante de tiempo.
- Aceleración angular. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la evolución de la aceleración angular de cada markers en cada uno de los tres ejes para cada instante de tiempo.
- Fuerza. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica la fuerza que ha de soportar cada punto del elemento localizado por un marker en cada instante de tiempo.
- Momento. De cada uno de los markers de los elementos hemos tomado datos en los tres ejes espaciales (X, Y y Z) de este parámetro que nos indica el momento que ha de soportar cada punto del elemento localizado por un marker en cada instante de tiempo.

Una vez expuestas los parámetros de que se estudiarán en la simulación, tomando datos de cada uno de ellos, veremos como es posible obtener estos datos en el programa.

En primer lugar debemos hacer correr la simulación, para ello una vez abierto nuestro archivo con el robot montado en MSC Adams, haremos clic en la opción del menú de herramientas “Interactive Simulations Controls”.

Después pasamos a darle los valores de tiempo y pasos de la simulación. En las opciones que aparecen en este mismo menú de herramientas.

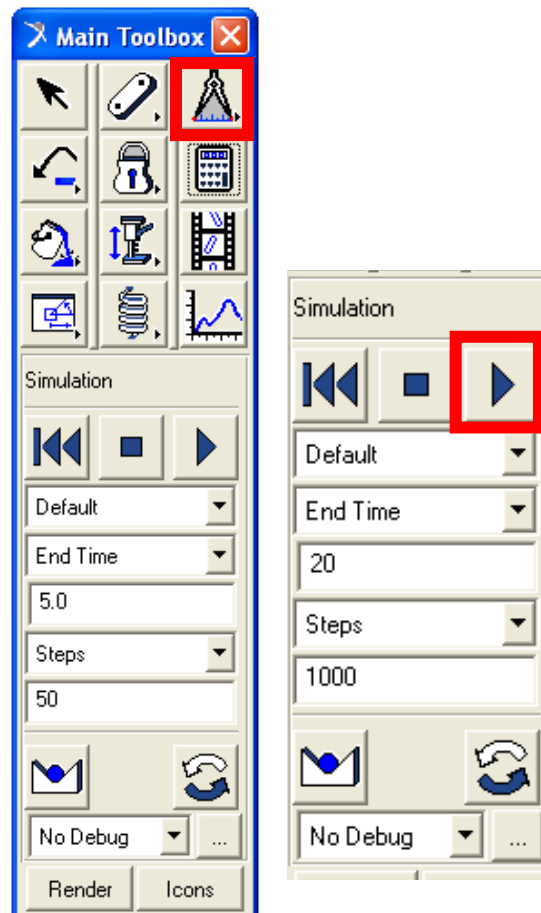


Figura 4.2.10 Menú de herramientas “Main Toolbox”

Una vez introducidas las variables de tiempo y pasos (en nuestro caso 20 segundos y 1000 pasos) podemos presionar el botón de *Play*, con lo que comenzará el proceso de simulación.

Cuando el programa ha finalizado el proceso de cálculo necesario para realizar la simulación, podemos empezar a tomar los datos necesarios. Para ello explicaremos el sistema realizando un marker como ejemplo. Haciendo clic en el botón derecho del ratón sobre cualquiera de las zonas de articulación (que es donde encontraremos los markers como se puede ver en las figuras 4.2.6 y 4.2.8) se nos desplegará un menú donde elegiremos el marker perteneciente al elemento que queramos (en el caso del

ejemplo el Marker 65 del Fémur derecho), y en el siguiente menú desplegable seleccionaremos la opción “Measure”.

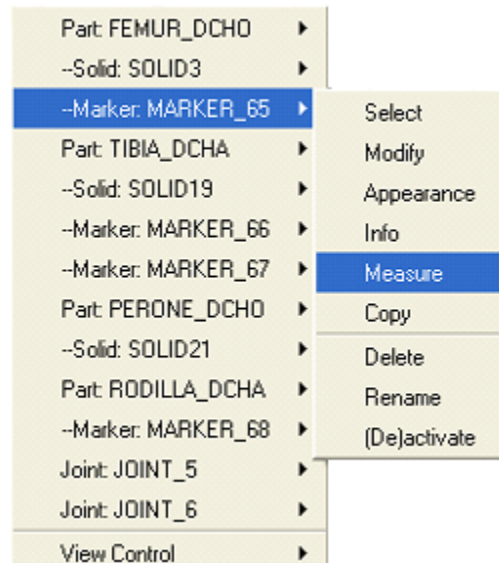


Figura 4.2.11 Menú desplegable

Una vez completado el paso anterior nos aparecerá una ventana de trabajo en la que podremos tomar los datos que necesitemos del marker que hemos seleccionado, como la de la siguiente figura:

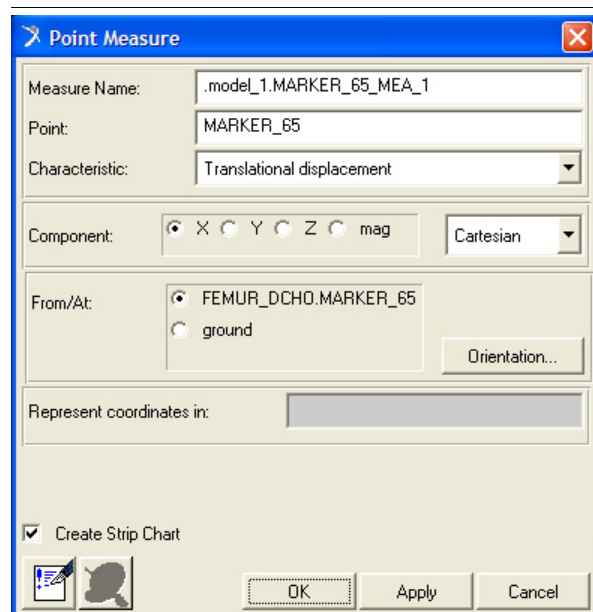


Figura 4.2.12 Ventana para la toma de datos de la simulación

Desde esta ventana vamos a tomar los datos que queramos de los parámetros que el programa ofrece y que interesan en este proyecto. Es interesante a la hora de tomar los datos cambiar el nombre, por ejemplo en vez de `.model_1.MARKER_65_MEA_1` podemos llamarlo de una manera más sencilla eliminando ese “MEA_1” por el nombre del parámetro del que estemos tomando datos. Si no hacemos esto las “medidas” tomadas se llamarán de la misma forma excepto por que cada una acabará en un número diferente. Sin embargo el comienzo del nombre original que hace referencia al modelo que se está usando (en este caso `.model_1.`) no se permite cambiarlo en el programa.

Para la toma de datos simplemente deberemos ir seleccionando en la pestaña “Characteristic” el parámetro que queramos, y seleccionar el eje a nuestro gusto. Presionamos el botón de OK (o *Apply* si queremos tomar datos de varios parámetros o varios ejes sin necesidad de abrir una nueva ventana), y obtenemos una gráfica.

Para acceder a la ventana de trabajo con los datos obtenidos (ADAMS/PostProcessor) podemos seguir dos caminos, el primero es en esa misma gráfica hacemos botón derecho sobre ella y en el menú desplegable que nos ofrece seleccionamos la opción “Transfer To Full Plot”. El segundo camino es hacer clic en el botón del menú (*Main Toolbox*) de la figura 4.2.10, en el que aparece el dibujo de una gráfica que se llama “Plotting”. De cualquiera de estas dos maneras tenemos acceso al PostProcessor de MSC ADAMS, con el que podremos exportar los datos obtenidos a mejores gráficas o a archivos de datos que pasar posteriormente a programas de tratamiento de datos como Microsoft Excel.

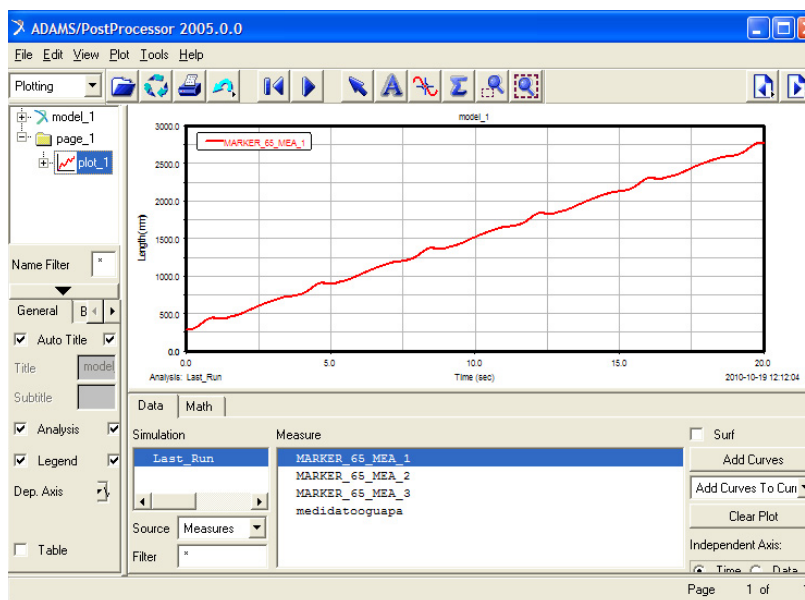


Figura 4.2.13 MSC ADAMS Post/Processor

Desde esta ventana de trabajo podemos exportar directamente la gráfica que se ve en pantalla como una imagen, o bien como una hoja de datos. Para exportar la gráfica

como imagen haremos lo siguiente, en el menú hacemos clic en “*File*”, y de las opciones que nos da elegimos “*Print*”, obteniendo la ventana que aparece en la siguiente figura.

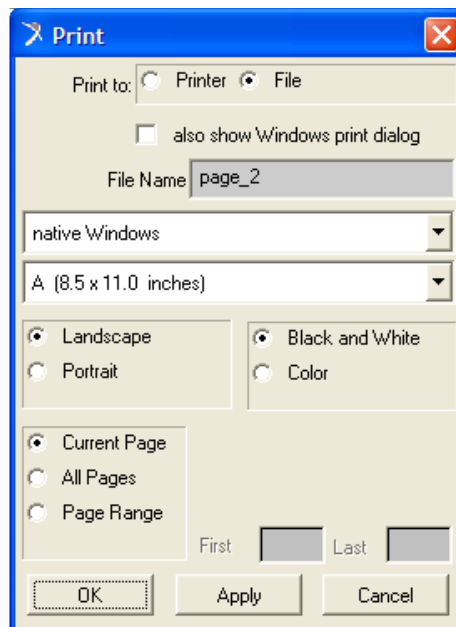


Figura 4.2.14 Ventana del Postprocesador

En esta ventana deberemos tener marcada la opción “Print to *File*”. En el hueco donde dice “*File Name*” podremos elegir el nombre que queramos dar a nuestro archivo gráfico. Después en la ventana donde dice “*native Windows*”, debemos cambiarlo al tipo de archivo de imagen que más nos convenga, en mi caso elegí archivos .tif.

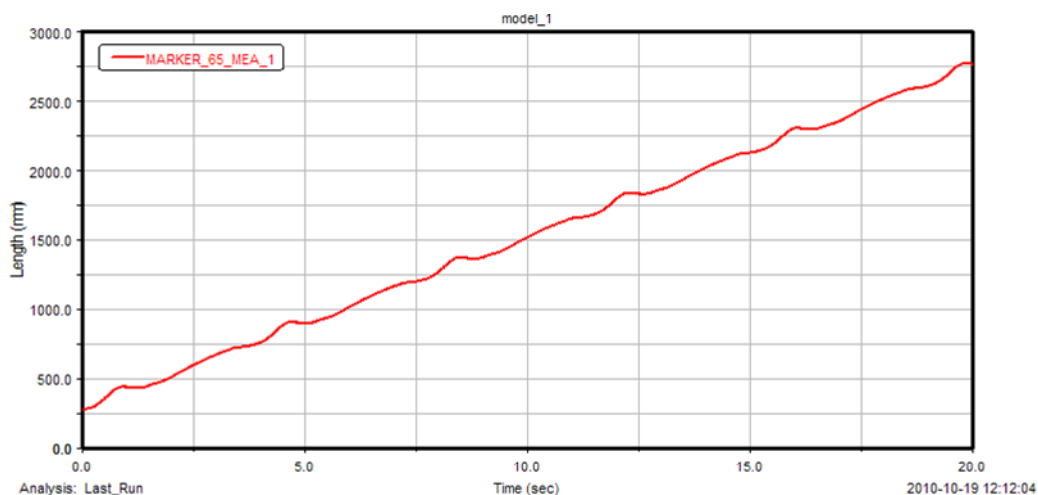


Figura 4.2.15 Archivo de imagen de la gráfica elegida

Sin embargo si lo que queremos es obtener un archivo en forma de tabla de datos, para procesarlos con otro programa lo que hacemos es marcar primero el plot en

que se encuentre los datos que queremos (en este caso el plot_2), y después en la parte inferior izquierda marcar la opción “Table”, obteniendo así los datos en forma de tabla.

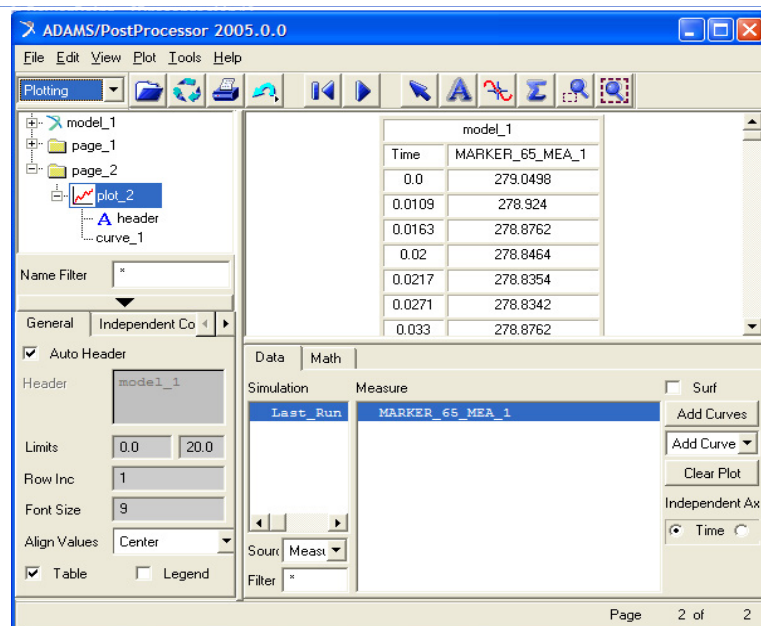


Figura 4.2.16 PostProcesador con los datos en forma de tabla

El siguiente paso será exportar esta tabla, para ello haremos clic en “File” eligiendo la opción “Export”, y elegimos “Table” y aparece la siguiente ventana.

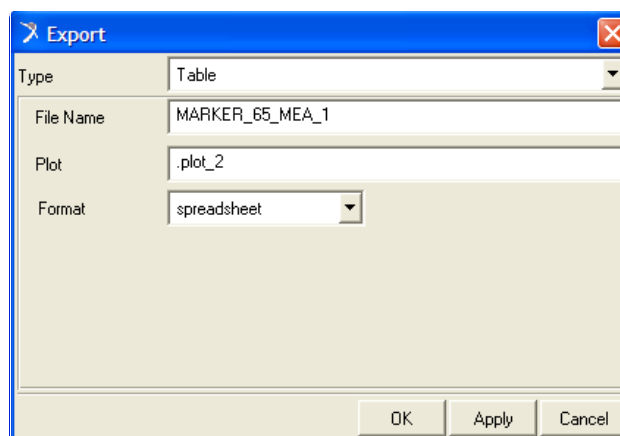


Figura 4.2.17 Exportación de tabla de datos

En esta ventana en la opción “*File Name*”, elegimos el nombre que queramos para nuestro nuevo archivo, y seleccionamos de nuevo el plot en el que estemos. En la última pestaña, que es la que nos da el formato del archivo, debemos seleccionar la opción “*spreadsheet*”. Ya tenemos nuestro archivo con extensión .tab en la ubicación que tengamos asignada.

A partir de aquí lo único que tenemos que hacer es abrir este archivo con el bloc de notas, copiar todos los datos de la tabla, y pegarlos en el programa de manipulación de datos que queramos. En mi caso fue Microsoft Excel versión del 2003.

Una vez en Excel podemos hacer las gráficas que queramos haciendo las modificaciones que mejor nos parezcan para obtener una imagen de gráfica lo mejor posible. Yo elegí la gráfica de dispersión sin marcadores de datos debido al enorme número de datos que aparece en cada una de gráficas que aparecen en este proyecto.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DEL ROBOT A ESTUDIAR

En el robot Pasibot existen una gran cantidad de puntos sobre los que tomar datos, como ya hemos visto anteriormente. Por ello una vez realizada la primera simulación, a partir de ella y de los datos obtenidos hemos seleccionado una serie de puntos en el robot sobre los que tomar datos en las siguientes simulaciones, ya que si hubiéramos tomado datos de todos los puntos para todas las simulaciones el volumen de información sería imposible de manejar, además de excesivo y con poca carga de información.

Markers elegidos para la nueva toma de datos

Los markers elegidos para toma de datos con cada una de las nuevas velocidades son los que aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 5.1.

Elemento	Marker
Manivela derecha	Marker 89
Tibia derecha	Marker 66
Pie derecho	Markers 59 y 61

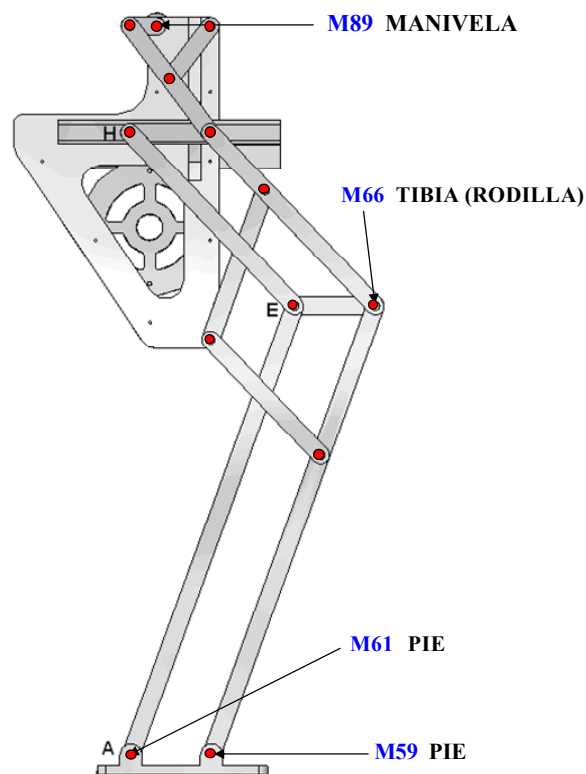


Figura 5.1.1 Posición de los markers elegidos para la toma de datos de las nuevas simulaciones con distintas velocidades de giro del motor

La localización de estos markers puede verse en la Figura 4.2.6, pero cabe señalar que son los markers que están colocados en la manivela en su punto de unión con la cadera, en la rodilla del robot, y en los pies. Con todos estos puntos no sólo estamos realizando un nuevo estudio de los puntos más importantes en diversos aspectos, si no que también están colocados de estratégicamente a lo largo del robot, con lo que podemos obtener una información bastante completa del robot.

La selección de estos puntos se ha basado en los siguientes parámetros:

- Situación estratégica de los puntos en el robot en las zonas más importantes, pies, rodillas y cadera.
- Localización que nos permita el estudio del movimiento del robot completo sin necesidad de estudiar todos sus puntos.
- Puntos a partir de los cuáles se origina el movimiento del robot.
- Puntos sobre los que recaigan grandes esfuerzos y dentro de su geometría sean puntos más débiles o más expuestos que el resto.

Una vez seleccionados estos puntos, será sobre ellos en los cuáles nos basemos para realizar el análisis comparativo en función de las diferentes velocidades de giro del motor. Este análisis que llevaremos a cabo por medio de comparación de los parámetros de cada uno de los markers elegidos.

Un aspecto importante a señalar de los markers es que existen dos para cada uno de los puntos donde se articulan varios elementos. Existirá un marker por cada elemento que participe en la articulación. Esto supone que para dos markers existentes en una misma articulación los valores de los parámetros de los que he tomado datos en la simulación serán los mismos. Sólo para los parámetros de fuerza y momento existirá una diferencia, y es que los valores en valor absoluto serán los mismos, pero tendrán distinto sentido ó signo.

5.2 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 59

El primer punto de estudio forma parte del pie. Está localizado como ya hemos dicho en el pie, en el punto de articulación entre el propio pie y la tibia. Del mismo modo que para el resto de markers, estudiaremos el efecto del cambio de la velocidad en todos los parámetros de los que hemos tomado datos durante la simulación.

Parámetro: Posición

▪ Eje X:

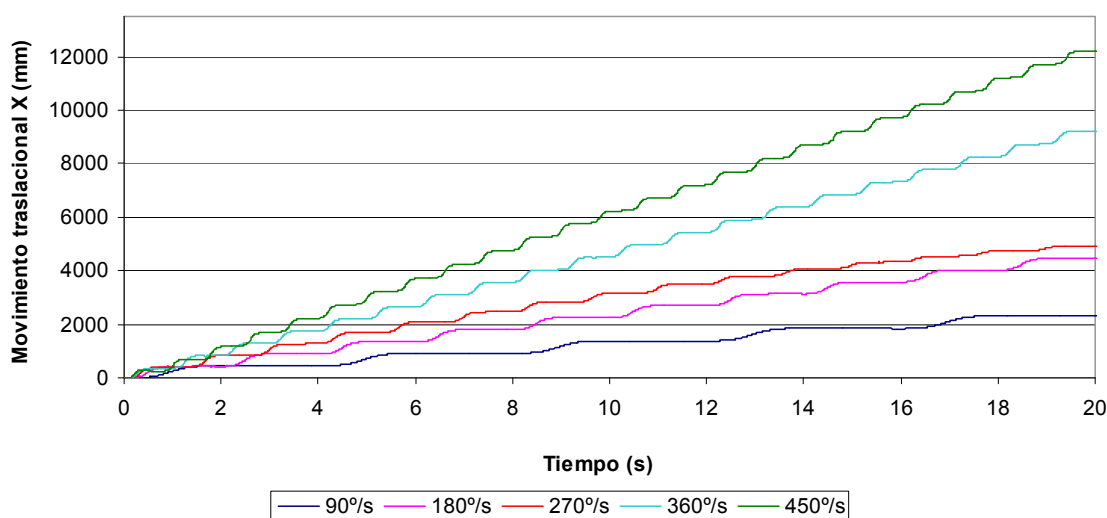


Figura 5.2.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

Lo primero que podemos apreciar en la gráfica es que al igual que en el marker anterior a medida que aumentamos la velocidad de giro del motor el robot recorre una mayor distancia. Esto era de suponer ya que al aumentar la velocidad de giro del motor el robot es capaz de dar más pasos en menor tiempo.

Lo segundo que llama la atención, y que se distingue del marker 89, es que como podemos ver con claridad la evolución de la posición a través del tiempo no es lineal, si no que como vemos tiene “escalones”. Esto se debe a que el pie es el elemento del robot que permanece casi fijo durante el paso del pie contrario. Así que como se ve en la gráfica durante ciertos intervalos de tiempo el pie permanece fijo en el suelo, y el resto del tiempo se encuentra desplazándose.

Del mismo modo que para el marker 89, vemos que para el marker 59 la posición final del mismo para cada velocidad de giro del motor:

- A $90^\circ/\text{s}$ el robot recorre 2300,95 mm en dirección X.
- A $180^\circ/\text{s}$ el robot recorre 4450,127 mm en dirección X.
- A $270^\circ/\text{s}$ el robot recorre 4919,438 mm en dirección X.
- A $360^\circ/\text{s}$ el robot recorre 9219,587 mm en dirección X.
- A $450^\circ/\text{s}$ el robot recorre 12223 mm en dirección X.

Si lo comparamos con la posición de ambos markers para cada velocidad de giro del motor, vemos como era de esperar, que la diferencia es de apenas decenas de milímetros, que la distancia máxima que los podría separar al pertenecer a un mismo cuerpo.

▪ Eje Y:

En cuanto a la posición de este marker perteneciente al pie veremos que de la misma forma que para el eje X, el movimiento se dará escalonadamente.

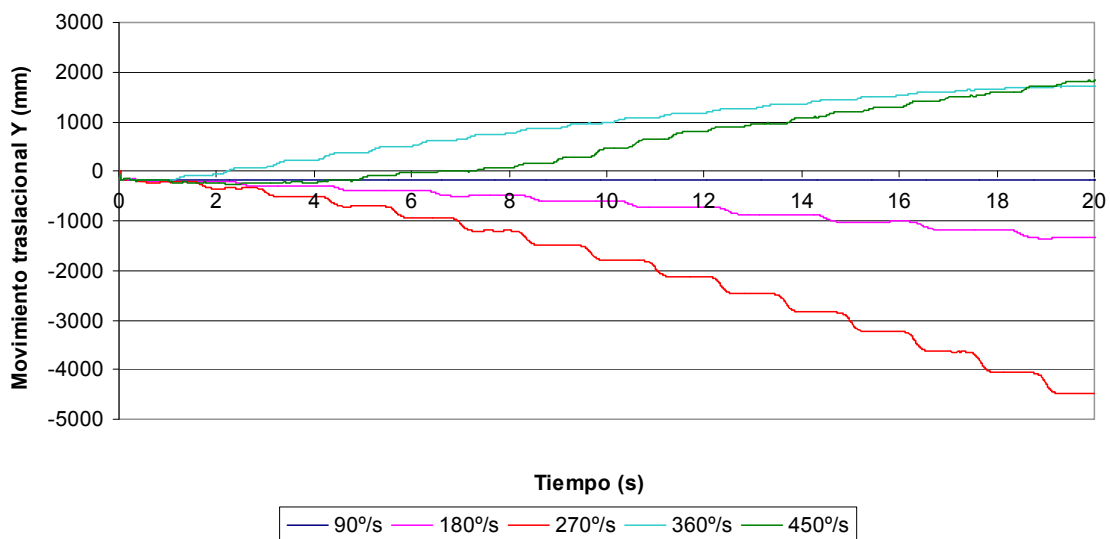


Figura 5.2.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

En cuanto a las distancias recorridas en dirección Y del robot, que serán la desviación del robot de la línea recta que se daría si el robot caminara perfectamente recto. Las desviaciones para cada una de las velocidades de giro del motor son:

- A 90°/s el robot se desvía 174,33 mm hacia la derecha.
- A 180°/s el robot se desvía 1337,25 mm hacia la derecha.
- A 270°/s el robot se desvía 4289,571 m hacia la derecha.
- A 360°/s el robot se desvía 1716,2 mm hacia la izquierda.
- A 450°/s el robot se desvía 1825,8 hacia la izquierda.

Las diferencias de la posición final del marker 59 con respecto a las del marker 89 para las diferentes velocidades de giro del motor, se debe a la posición final del pie derecho (al que pertenece este marker) con respecto al ciclo de paso. Es decir dependiendo de si el pie derecho ha terminado en la simulación adelantado o retrasado, entonces eso supondrá que los valores de posición para el eje Y serán mayores o menores que los del marker 89.

▪ Eje Z:

En el estudio del movimiento traslacional del marker en el eje Z veremos como no hay apenas diferencia en el movimiento vertical del pie. Lo que sí podremos apreciar será la diferencia de cadencias en el paso para las distintas velocidades.

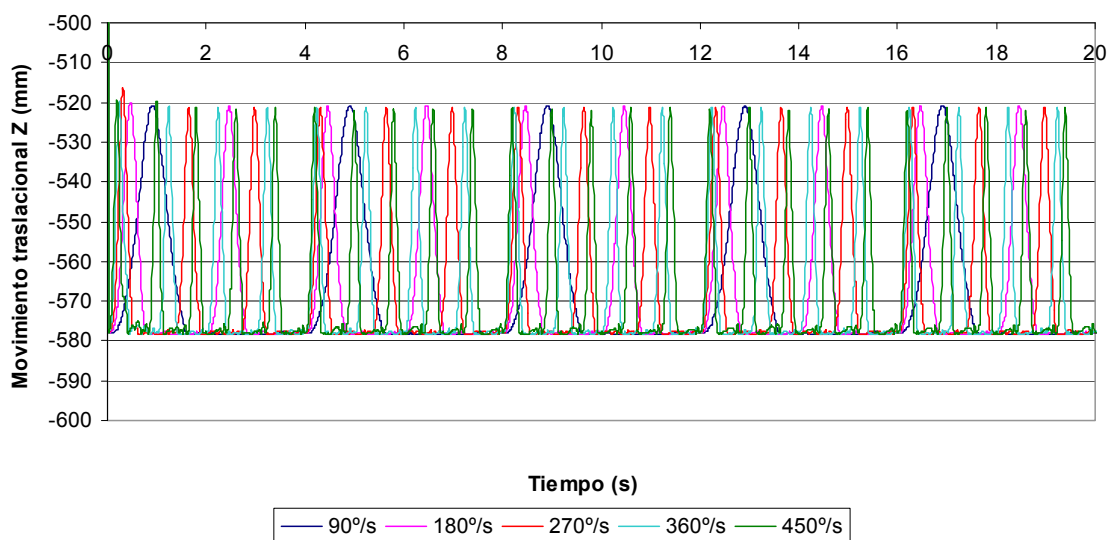


Figura 5.2.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

Podemos ver en la Figura 5.2.3 como el punto más alto que alcanza el marker en su movimiento es el mismo para todas las velocidades de giro del motor, pero sí podemos ver como a medida que aumenta la velocidad de giro del motor el robot dará más pasos en un mismo tiempo.

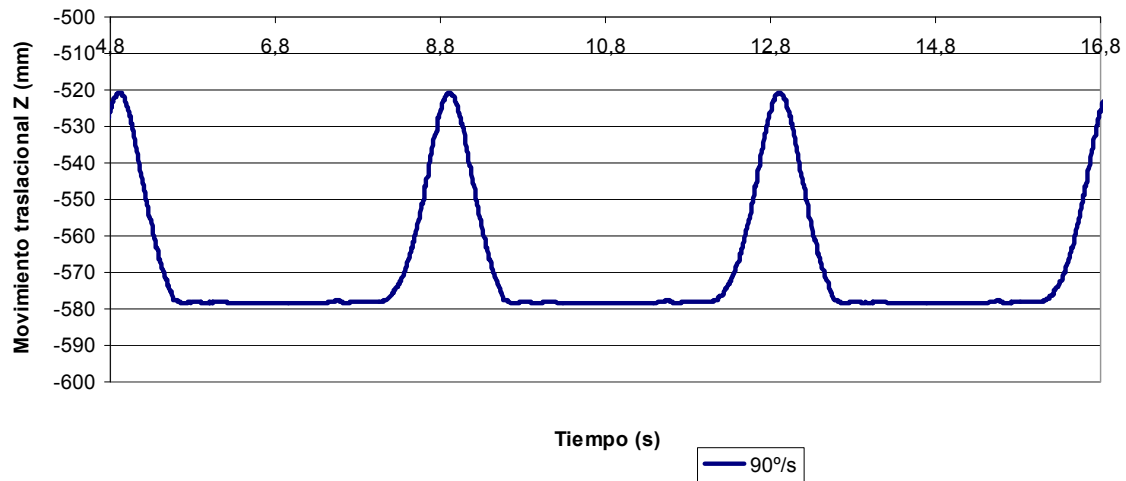


Figura 5.2.4 Movimiento traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

En la Figura 5.2.4 vemos la curva del movimiento traslacional, o posición, en función del tiempo para una velocidad de 90 °/s de giro del motor y para un intervalo de tiempo reducido pudiendo así apreciar la curva con más detalle.

El resto de curvas para las otras velocidades de giro del motor tienen una forma prácticamente idéntica, y se puede ver en el Anexo A3, que es el del marker 59.

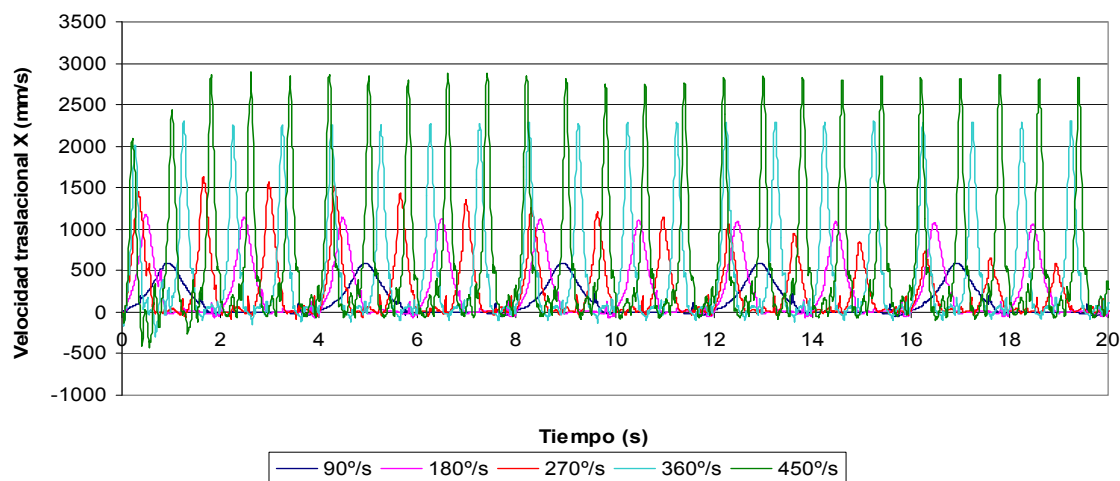
Parámetro: Velocidad traslacional▪ **Eje X:**

Figura 5.2.5 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

En la gráfica de la velocidad traslacional para el eje X podemos ver como la velocidad en la dirección del movimiento va teniendo valores mayores a medida que aumentamos la velocidad de giro del motor.

En este caso las velocidades mínimas serán aproximadamente cero debido a que este pie deberá permanecer parado y lo más estable posible para que el pie izquierdo realice su paso también. Sin embargo debido a la inestabilidad, producida en el robot por las altas velocidades de giro del robot, habrá puntos en los que la velocidad traslacional en el eje X será negativa. Esto ocurrirá debido a que el pie no permanecerá completamente fijo e inmóvil en el suelo mientras el otro pie realiza su paso, si no que el pie apoyado en el suelo se deslizará ligeramente lo que produce que la velocidad traslacional en el eje X en ciertos momentos tenga valor negativo.

En la siguiente gráfica podemos ver los valores medios máximos y mínimos de la velocidad traslacional en el eje X para las distintas velocidades de giro del motor. Cabe señalar que para el caso de velocidad de giro del motor de 270 °/s como se puede ver en el anexo el gráfico para esta única velocidad de giro del motor, los valores máximos de la velocidad traslacional se van haciendo más pequeños. Esto se debe a que con esta velocidad de giro del motor el robot se desvía más de la dirección X que para las demás velocidades de giro del motor y en menos espacio. Con lo que al rotar el robot las velocidades van variando en sus ejes, es decir, quedado que el robot irá girando sobre sí mismo el valor inicial de la velocidad traslacional en el eje X pasará a descomponerse entre el eje X y el Y, y dado que tiene un mayor valor la velocidad de

avance (inicialmente X) que la de Y entonces la velocidad en el eje X disminuirá mientras que en el eje Y aumentará.

En menor medida también ocurrirá para la velocidad de giro de motor de 180 °/s.

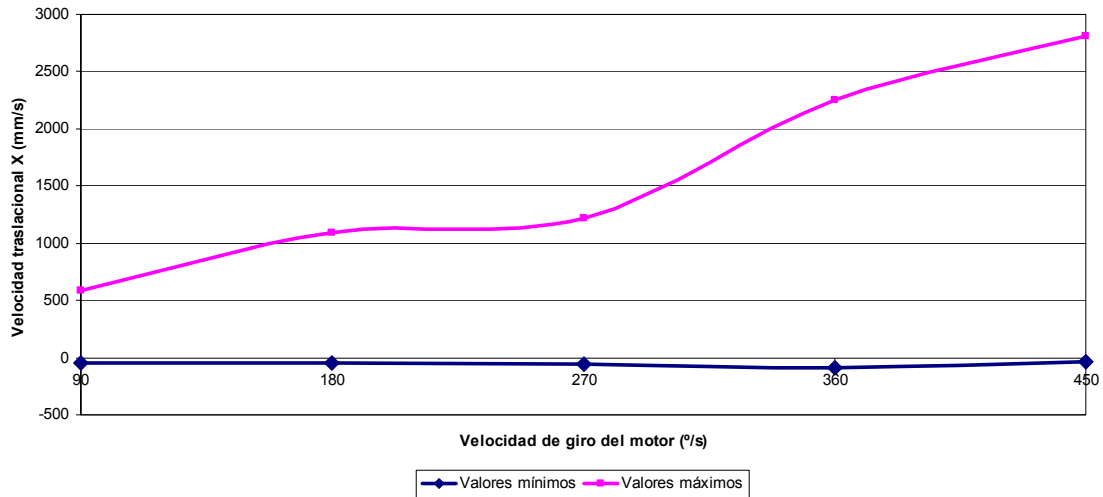


Figura 5.2.6 Valores máximos y mínimos medios para la velocidad traslacional en X en función de la velocidad de giro del motor del marker 59

▪ Eje Y:

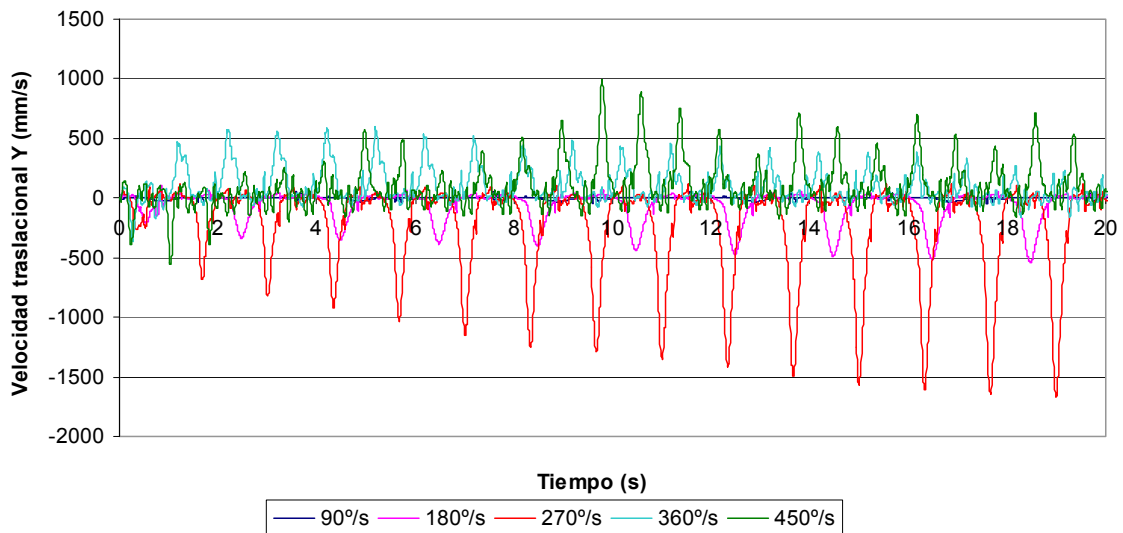


Figura 5.2.7 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

En el caso del eje Y para la velocidad traslacional el hecho de que tenga valores positivos o negativos dependerá de hacia que lado se desvíe el robot para cada velocidad. En este gráfico también podemos ver que, como comentábamos anteriormente para el eje X, la velocidad traslacional en el eje Y aumentará debido a que el robot se desvía de su eje de caminata.

▪ Eje Z:

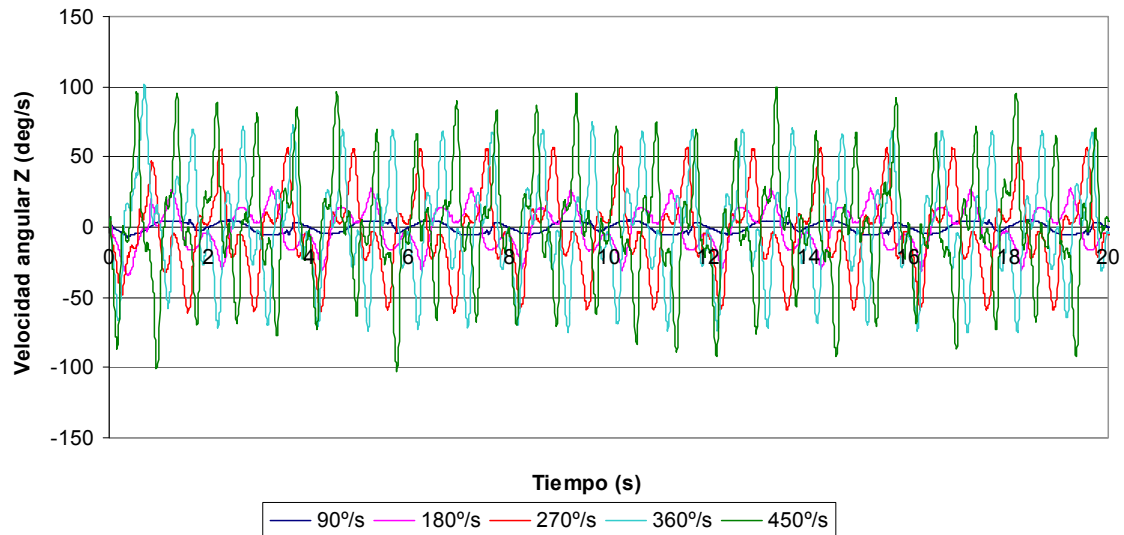


Figura 5.2.8 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

En el eje Z de la velocidad traslacional vemos que el ciclo que se produce con cada paso es primero un aumento de la velocidad en valores positivos, para después pasar a valores negativos. Esto se debe a que con cada paso el pie sube para después bajar. Vemos en la siguiente gráfica la evolución de los valores medios de las velocidades máximas y mínimas traslacional en el eje Z para las distintas velocidades de giro del motor.

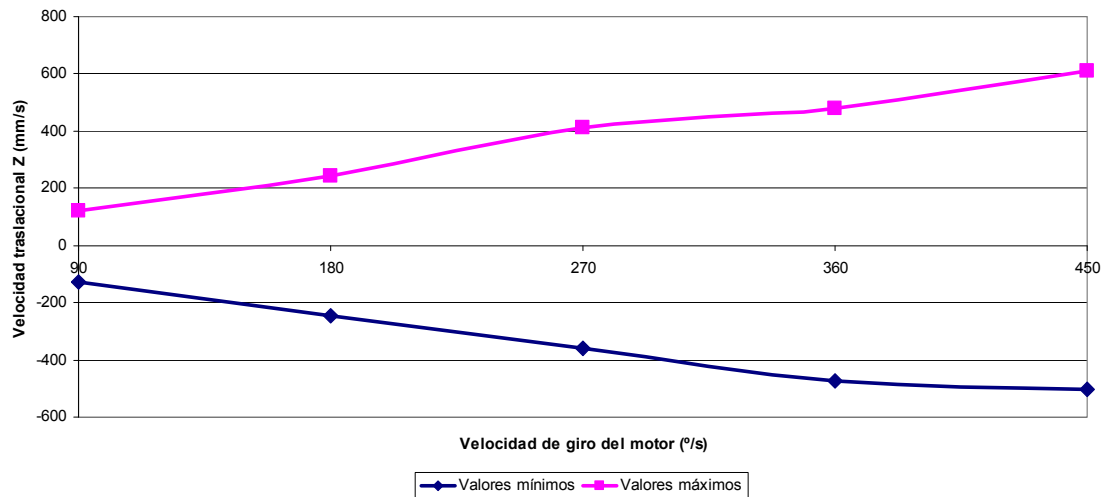


Figura 5.2.9 Valores máximos y mínimos medios para la velocidad traslacional en Z en función de la velocidad de giro del motor del marker 59

Parámetro: Velocidad angular

▪ Eje X:

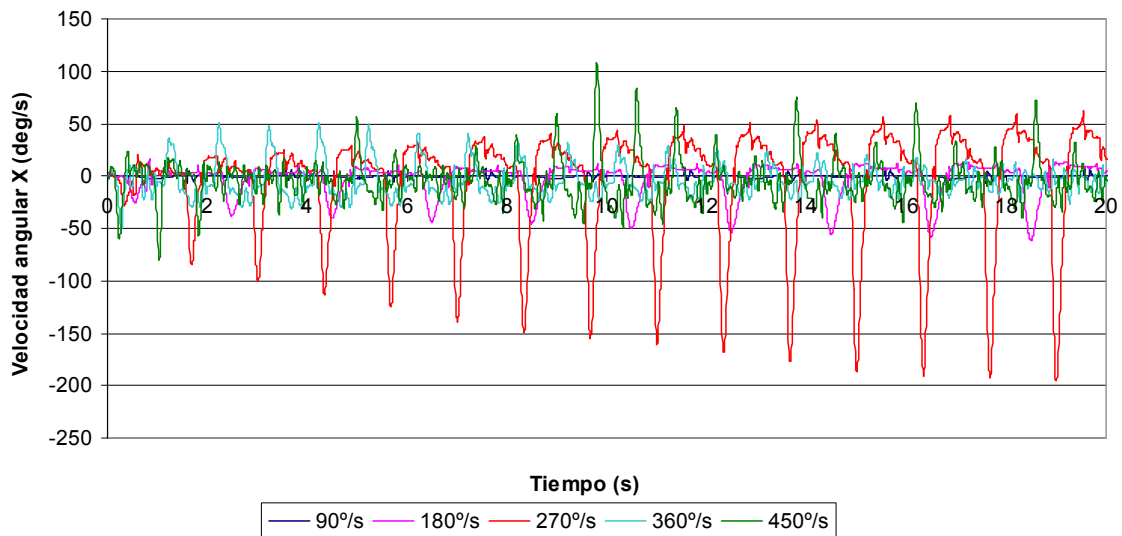


Figura 5.2.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

En un principio el parámetro de la velocidad angular en el eje X nos indicaría lo inestable del paso del robot al caminar. Veríamos como el robot se balancea de derecha a izquierda en mayor o menor medida dependiendo de la velocidad de giro del motor.

Sin embargo para algunas de las velocidades de giro del motor, como ya hemos visto anteriormente, al girar el robot y descomponer la velocidad en ejes estáticos el

valor de la velocidad en los ejes podrá cambiar si el robot gira. Debido a esto podemos ver como la velocidad en el eje X, en los casos que el robot gira más, el valor de los ciclos de la velocidad va aumentando, ya que en un principio la velocidad angular que tendrá mayor valor será la del eje Y. Pero al girar el robot y cambiar la descomposición de la velocidad en los ejes, la velocidad en X se verá aumentada.

-
- **Eje Y:**

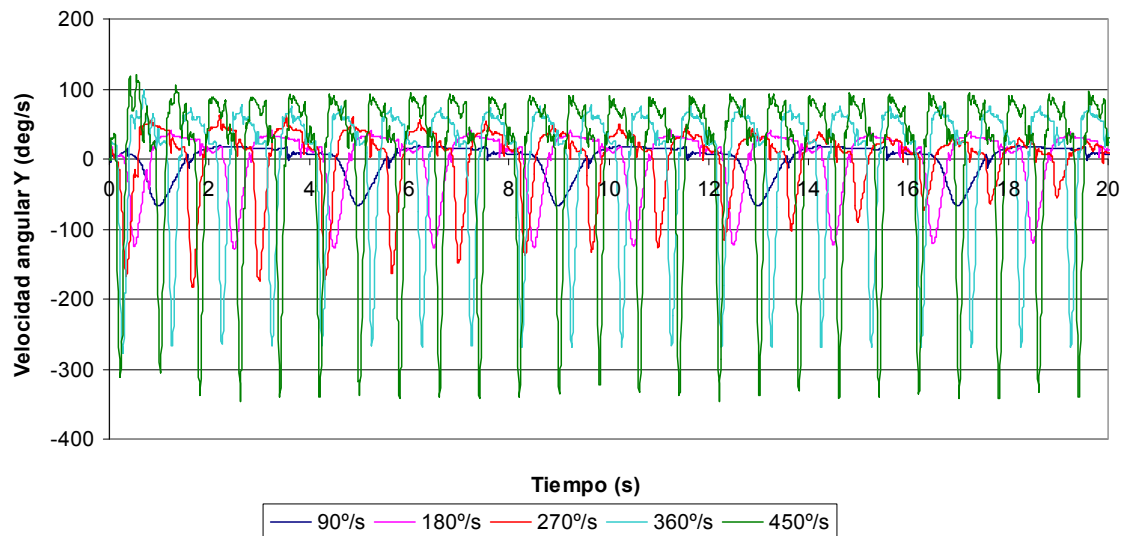


Figura 5.2.11 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker
59

Como hemos dicho antes la velocidad angular en el eje Y será la que tenga los mayores valores ya que es la dirección del movimiento angular del paso. También podemos ver como para el caso de velocidad de giro del motor de 270 °/s.

▪ Eje Z:

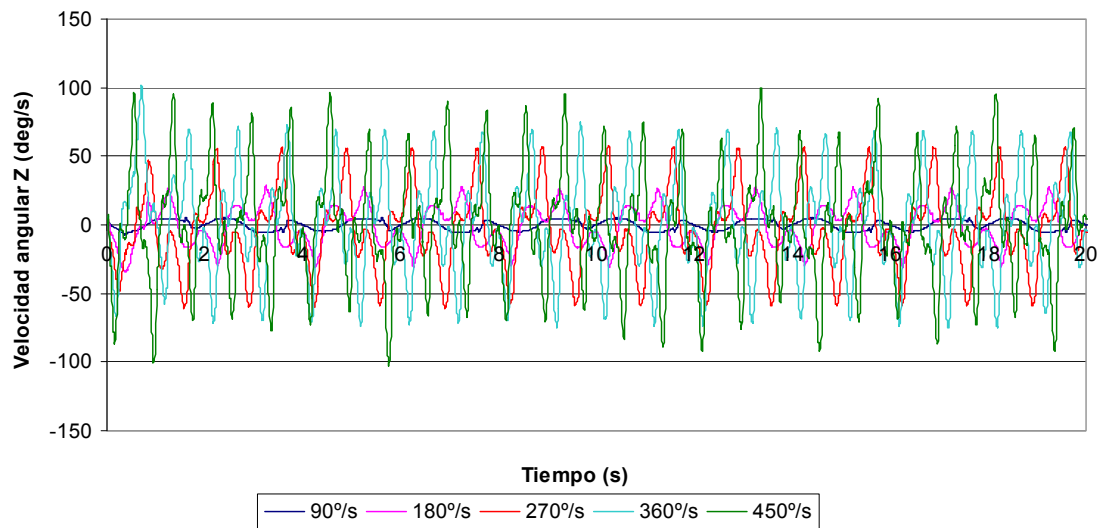


Figura 5.2.12 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker

59

La velocidad angular del eje Z nos indica la velocidad de rotación que tiene el robot alrededor de su eje vertical al caminar. Como vemos en la gráfica las curvas describen ciclos muy claros en los que el robot rota ligeramente hacia un lado primero y después al realizar el paso con el otro pie, el robot rota en el otro sentido.

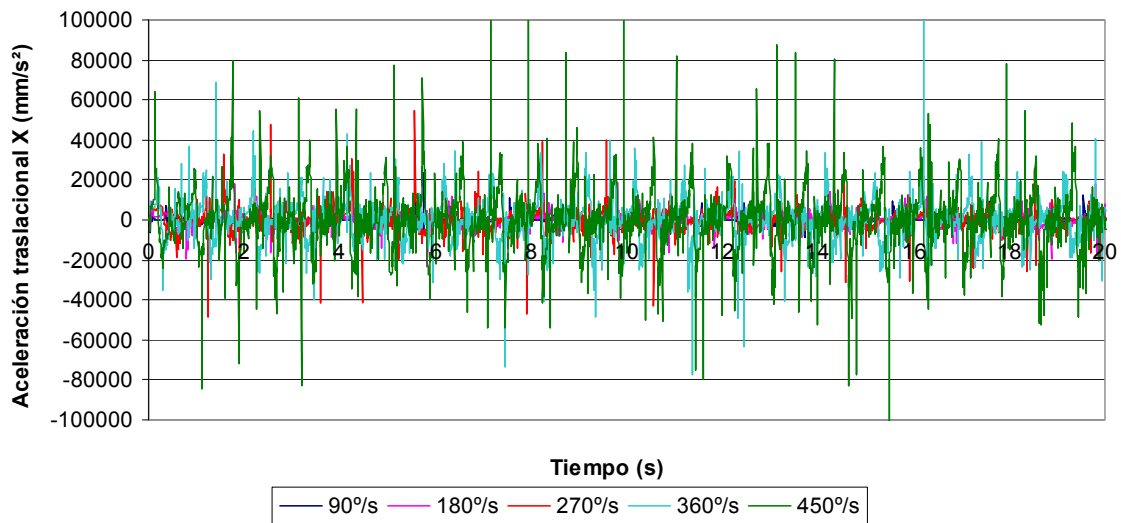
Parámetro: Aceleración traslacional**▪ Eje X:**

Figura 5.2.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

La información que nos ofrece este primer gráfico con respecto a la aceleración traslacional en el eje X es que a medida que aumentamos la velocidad de giro del motor los valores de la aceleración traslacional aumentan su valor. La aceleración aumentará su valor máximo con mayores velocidades de giro del motor, del mismo modo la aceleración negativa, que se dará cuando el robot esté finalizando su paso tendrá un valor absoluto mayor también para poder frenar y alcanzar su posición estática para que el otro pie realice el siguiente paso.

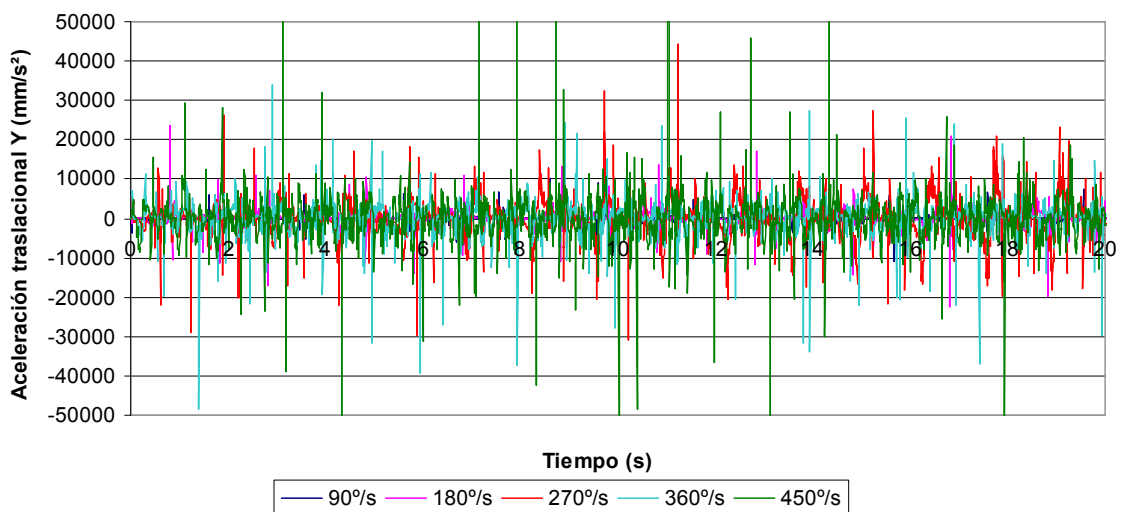
▪ Eje Y:

Figura 5.2.14 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

▪ Eje Z:

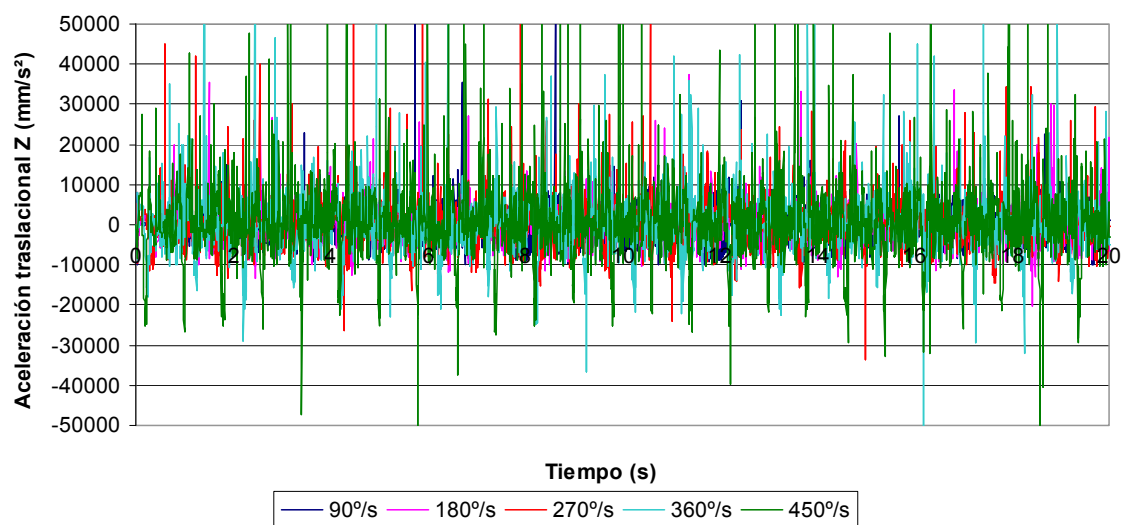


Figura 5.2.15 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

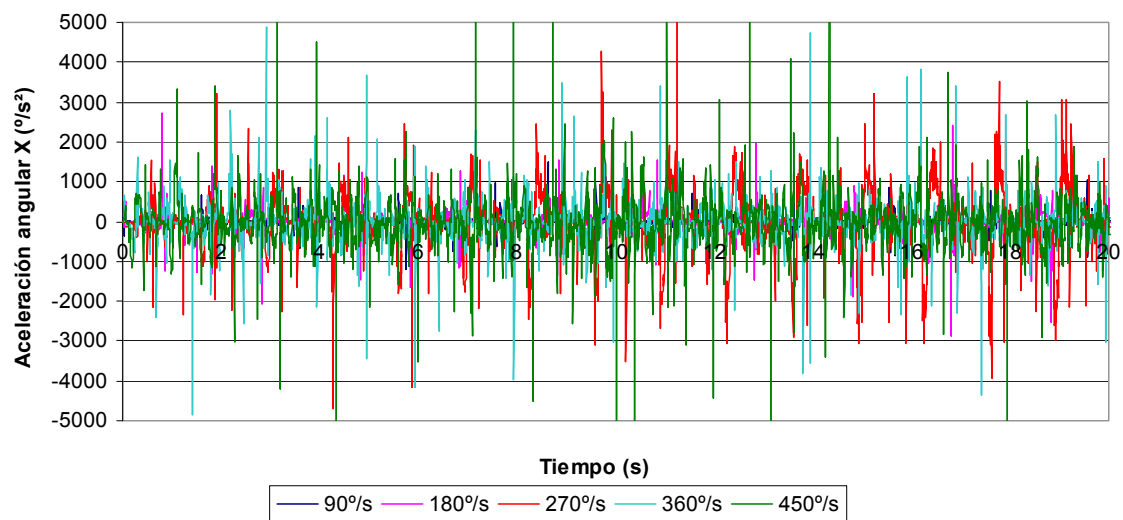
Parámetro: Aceleración angular**▪ Eje X:**

Figura 5.2.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

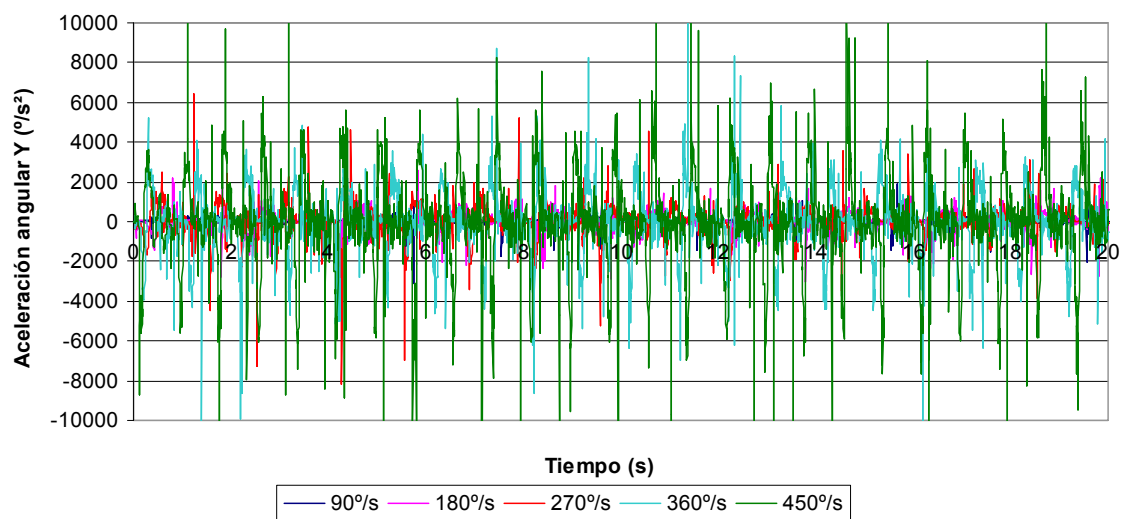
▪ Eje Y:

Figura 5.2.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

▪ Eje Z:

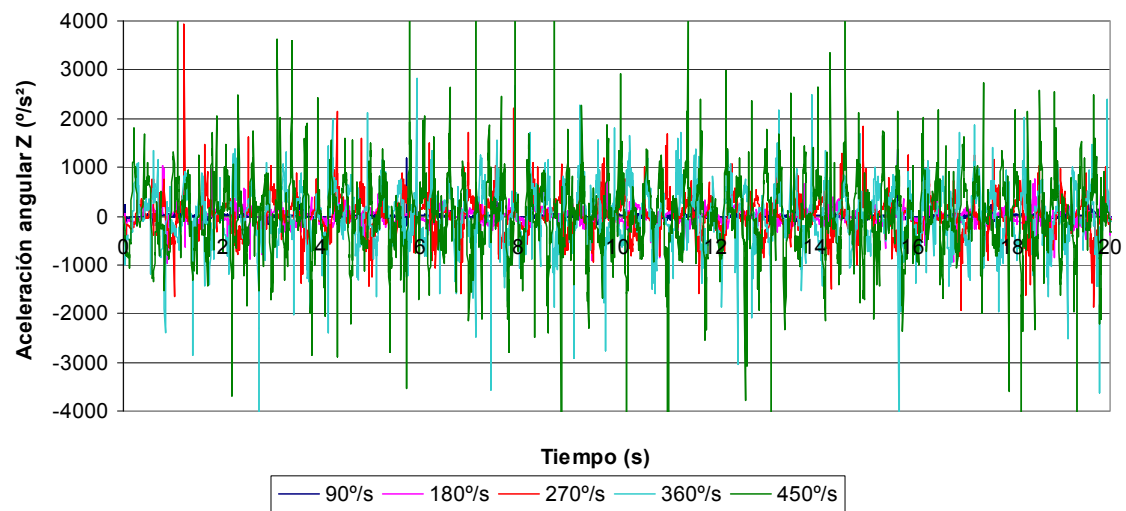


Figura 5.2.18 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

Parámetro: Fuerza**▪ Eje X:**

El parámetro Fuerza para este marker va a tener una gran importancia ya que va a ser la reacción que tenga el marker perteneciente al pie con respecto a cada paso.

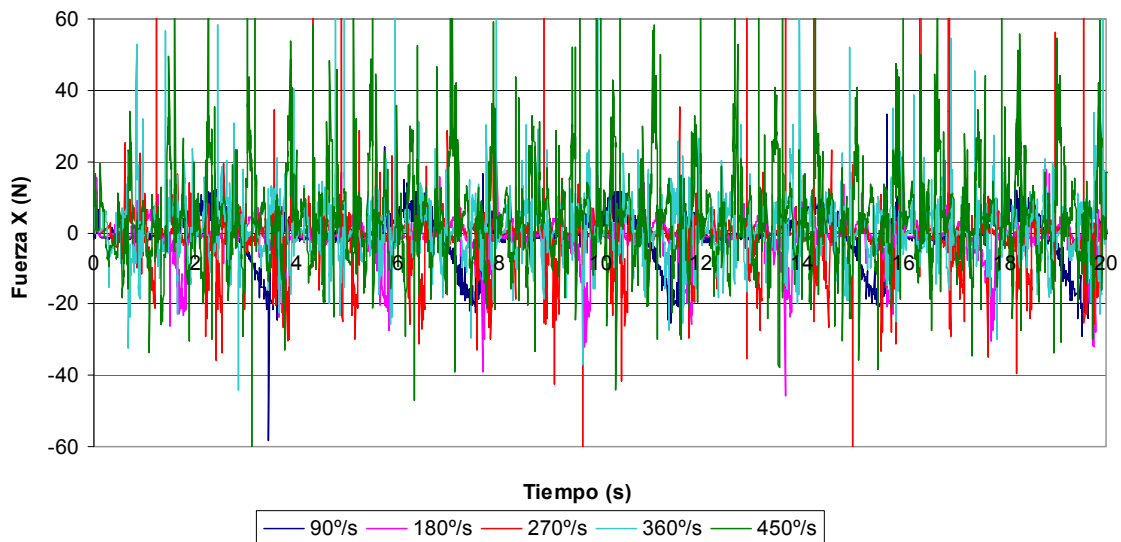


Figura 5.2.19 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

En el eje X podemos ver, a pesar de los picos erráticos, como los valores máximos se mantienen aproximadamente igual para todas las velocidades de giro del motor. Para poder ver mejor este parámetro y la curva descrita por sus valores cada tres pasos dados por el pie derecho, vemos las siguientes gráficas en las que sólo se muestra el tiempo necesario para que el pie derecho dé tres pasos.

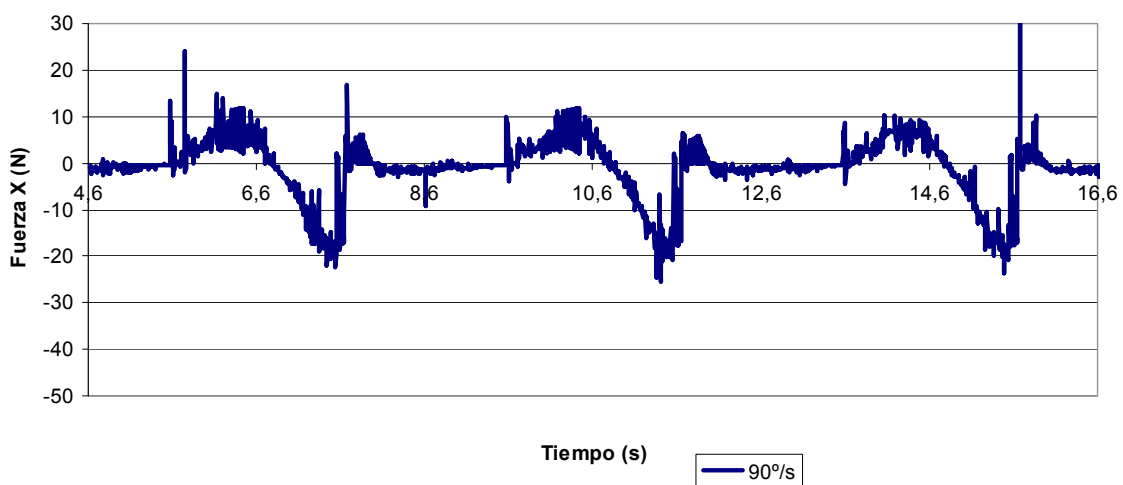


Figura 5.2.20 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

Todas las gráficas para las curvas con distintas velocidades de giro del motor que nos muestran el parámetro Fuerza en X en función del tiempo pueden verse en el Anexo A3.

Vemos en estas gráficas más claramente como los valores máximos son prácticamente iguales para las distintas velocidades de giro del motor, estando como vemos en la gráfica con valor máximo de 10 N y valor mínimo -20 N. Con lo que podemos deducir que la velocidad de giro del motor no afecta a este parámetro.

En las gráficas podemos ver como en una primera parte del ciclo de cada paso cuando el pie derecho se apoya en el suelo, el marker sufre una fuerza en dirección X y sentido positivo ya que el robot en este momento está comenzando a inclinarse hacia delante con ambos pies apoyados. Sin embargo en el momento en que el pie izquierdo se levanta del suelo los valores de la fuerza cambian ya que el peso del robot tira hacia atrás del mismo produciendo fuerzas en sentido negativo de X.

▪ Eje Y:

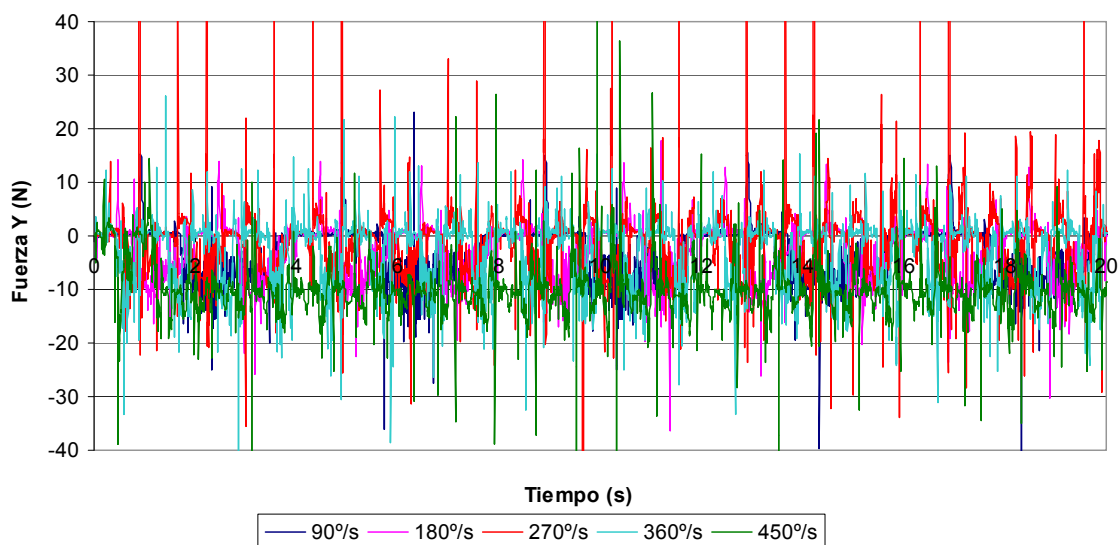


Figura 5.2.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

Vemos también en este caso las curvas por separado, las cuáles pueden verse en el Anexo A3.

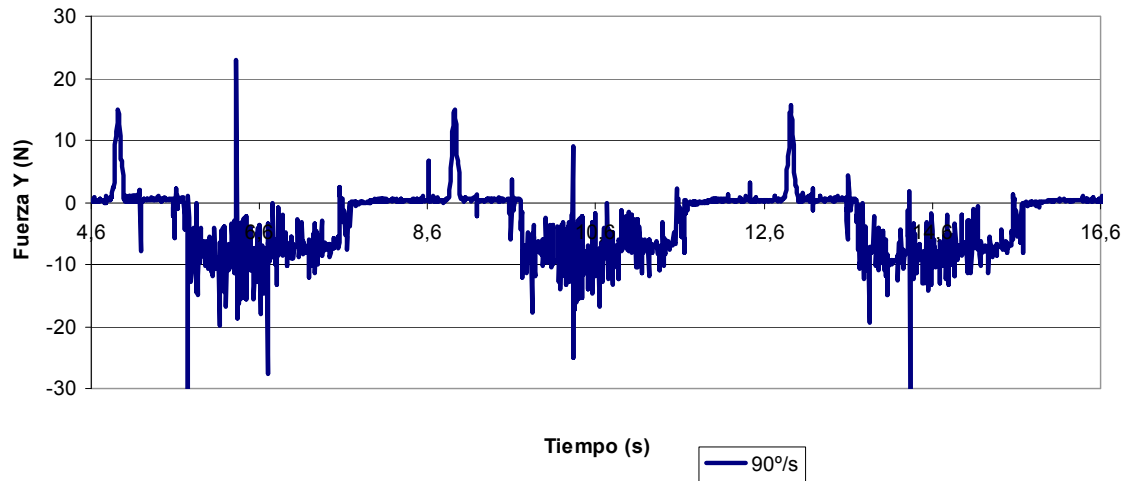


Figura 5.2.22 Fuerza en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

En el eje Y también observamos como el valor de la velocidad de giro del motor no afecta a la Fuerza. Los valores mínimos en todos los casos están en -10 N.

Durante la mayor parte del tiempo los esfuerzos se dan hacia el sentido negativo del eje Y, es decir apuntando hacia afuera del robot. Esto es lógico ya que mientras el pie está apoyado en el suelo, y el izquierdo está realizando el paso, la posición del centro de masas del robot lo inclina hacia dentro, esto hace que el resto de estructura de la pierna sienta el esfuerzo hacia es lado. Pero el pie al estar apoyado en el suelo sufre una fuerza en sentido negativo de Y al intentar el robot volcarse hacia la pierna izquierda (que en este caso estará alzada) y siendo el pie el impedimento a este movimiento, con lo que se ve “empujado” hacia el sentido negativo de Y.

▪ Eje Z:

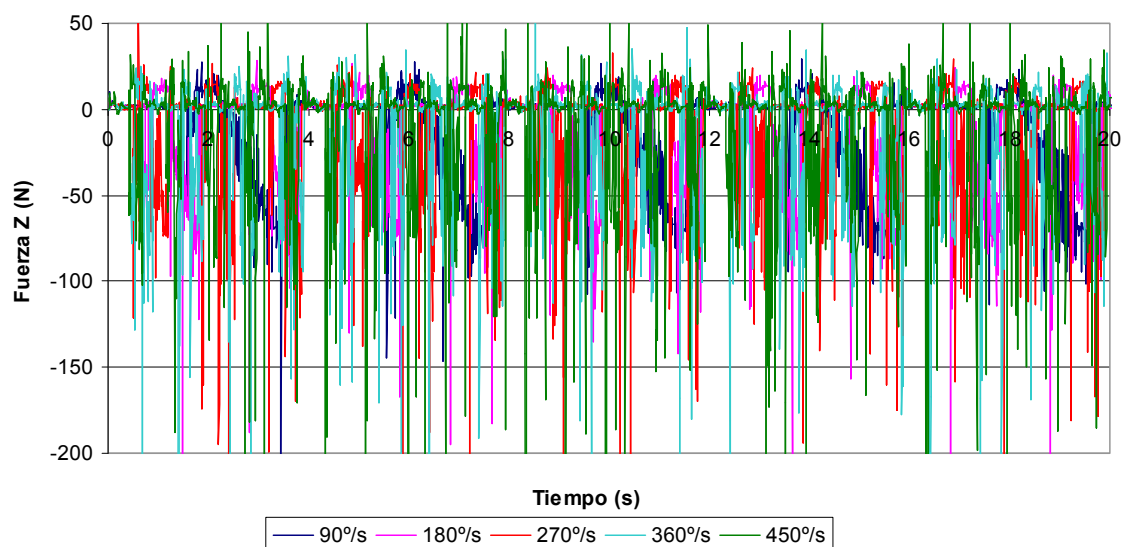


Figura 5.2.23 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

El eje Z será, como era de esperar, el eje en el que el marker sufra mayores esfuerzos de los tres ejes, ya que entre los dos markers del pie se produce la reacción del peso del cuerpo al contacto con el suelo en dirección vertical. Vemos las curvas por separado para tres pasos cada una de ellas en el Anexo A3, y en el presente documento vemos como ejemplo el caso para la velocidad de 90 °/s de giro del motor.

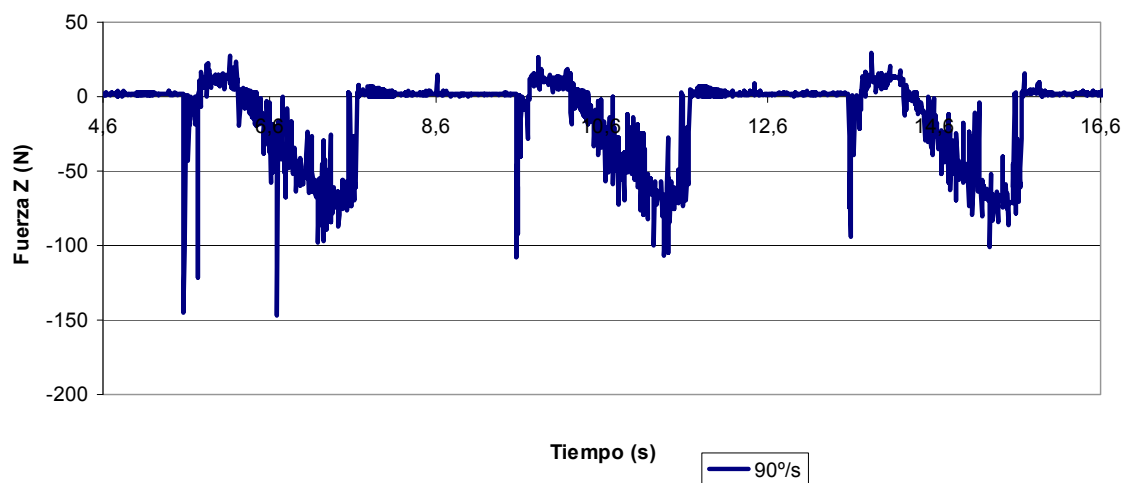


Figura 5.2.24 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

Como vemos en todas ellas los valores máximos son mayores que para los esfuerzos dados en las otras dos direcciones. La reacción dada en este punto perteneciente al pie tiene un valor máximo en valor absoluto de 70 N.

Parámetro: Momento**▪ Eje X:**

En este punto vamos a ver los esfuerzos flectores producidos en el marker para las distintas velocidades de giro del motor.

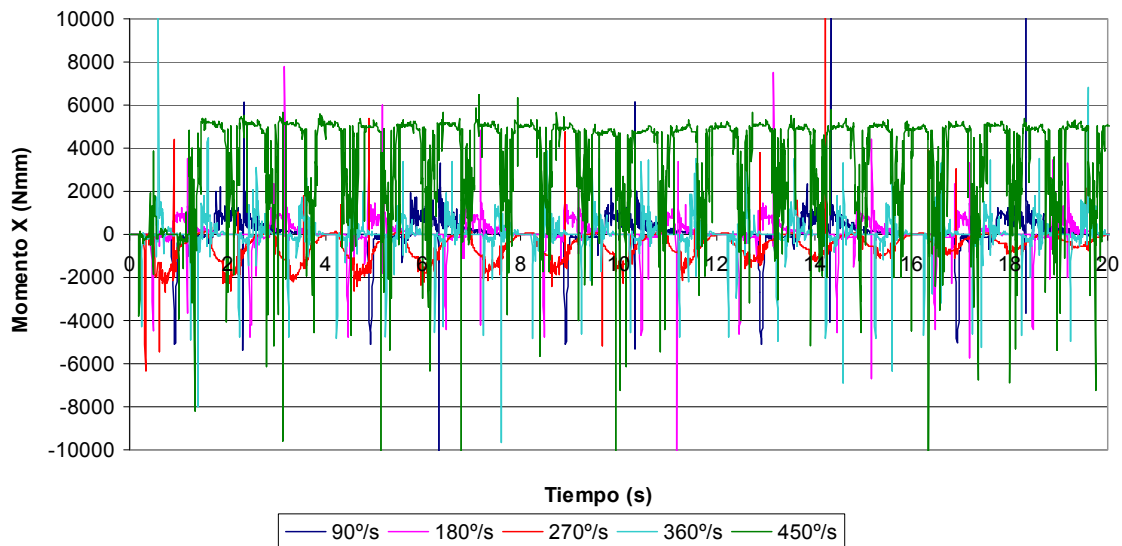


Figura 5.2.25 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 59

En la gráfica podemos ver como todas las curvas describen cíclicamente el proceso del paso. Cuando el pie izquierdo esté alzado será el tiempo en el que el pie derecho sufra los mayores esfuerzos, que irán disminuyendo a medida que el pie izquierdo llegue a la plataforma disminuyendo los esfuerzos en el pie derecho hasta que alcanzan un valor nulo, que es el tiempo que pasa el pie derecho en el aire realizando el paso. Vemos posteriormente un ciclo de tres pasos para cada curva por separado.

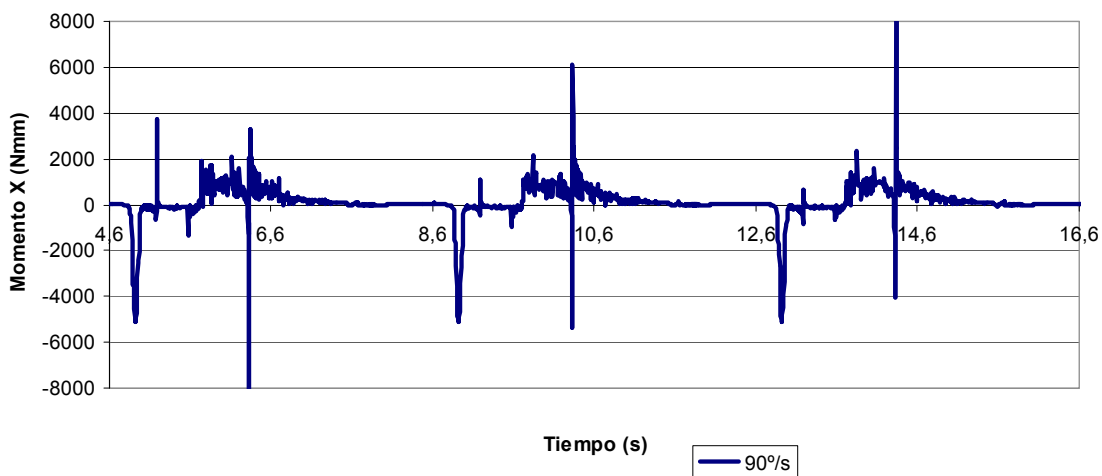


Figura 5.2.26 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

El esfuerzo que vemos representado en la gráfica vendrá provocado por la fuerza en sentido negativo del eje Y. El peso del robot inclinándose hacia su eje supone como ya hemos comentado una fuerza, en el elemento pie, de valores negativos, lo que resulta en un par en sentido positivo del eje X.

▪ Eje Y:

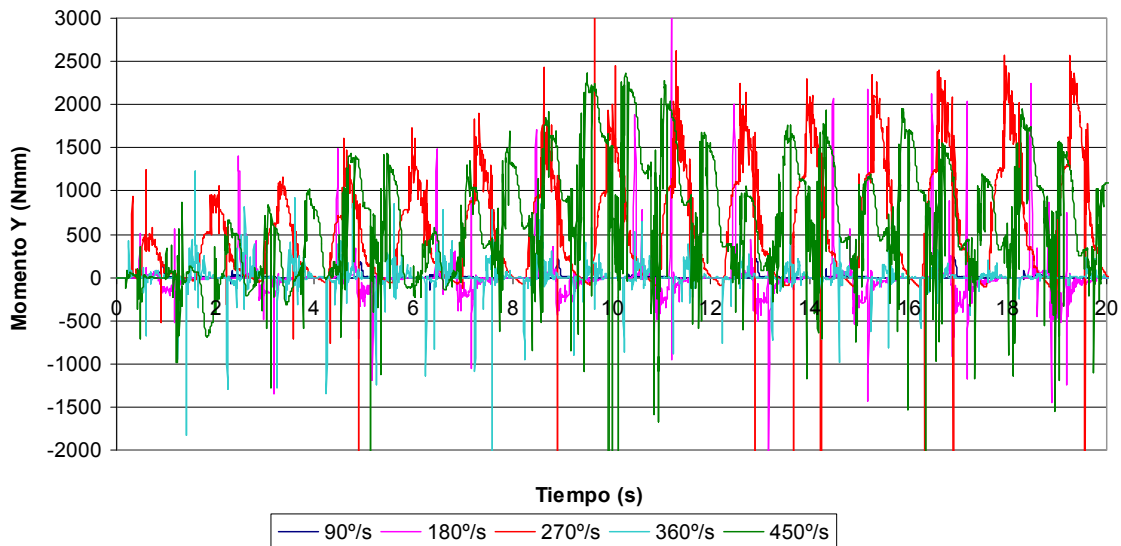


Figura 5.2.27 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 59

Si comparamos las gráficas para el momento en el eje X en el eje Y podemos ver como en X para algunas curvas los valores máximos van disminuyendo, mientras que en Y van aumentando, esto ya lo hemos explicado anteriormente con la inestabilidad del robot, y el hecho de que este se desvíe de la línea recta que traza el eje X hacia los lados, dependiendo de la velocidad de giro del motor, haciendo que la posición de los ejes espaciales en relación al robot cambien su posición. Vemos en las siguientes gráficas tres pasos completos con cada curva por separado.

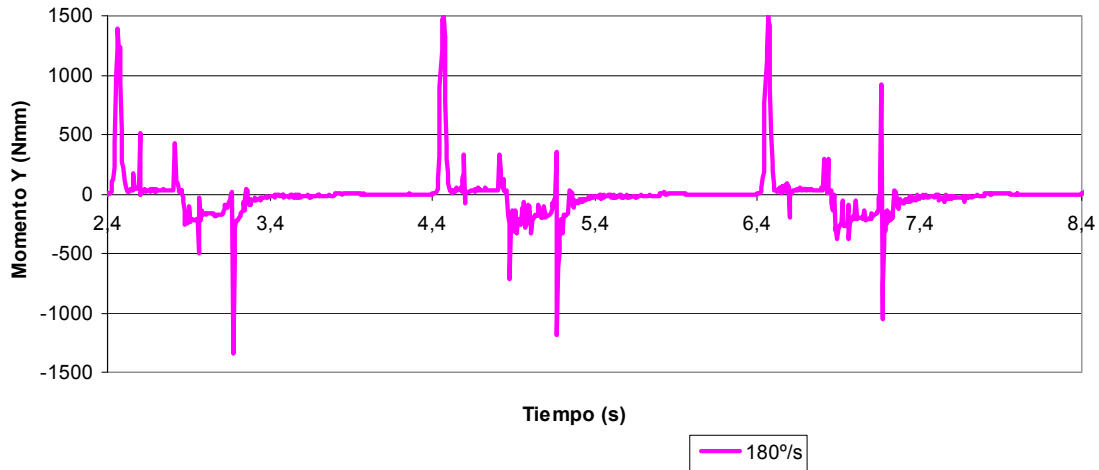


Figura 5.2.28 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

Como se puede apreciar en las curvas los valores máximos se dan para aquellas velocidades más altas de motor, que será cuando el robot camine más deprisa con lo que será más inestable y sus contactos con la plataforma serán más bruscos y pronunciados. El resto de gráficas puede verse en el Anexo A3.

▪ Eje Z:

En la gráfica del momento flector en el eje Z vemos como a pesar de los saltos de pico dados en ciertos momentos de valores puntuales, las curvas también describen ciclos en los pasos dados por los pies, como en los casos anteriores. También ahora el periodo en el que el pie está apoyado soportando el peso es el periodo en el que se dan los valores máximos mientras que cuando el pie contrario va bajando hasta apoyarse en la plataforma y el pie derecho se eleva hasta permanecer suspendido en el aire, es el tiempo en el que los valores de la curva disminuyen hasta llegar a su valor original.

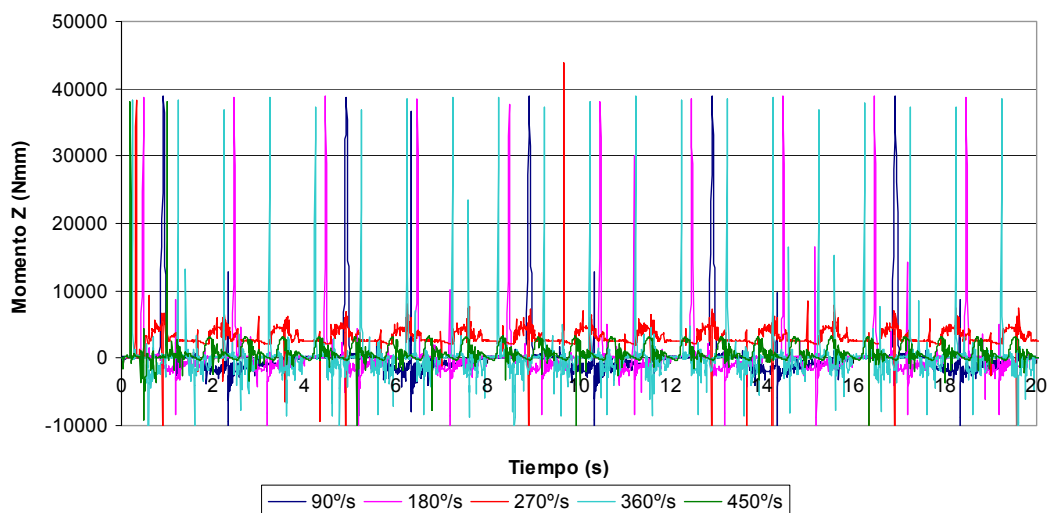


Figura 5.2.29 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 59

Vemos en cada una de las curvas que conservan una forma similar. En ellas podemos ver el efecto de cada paso en este punto del pie. Debido al pivotamiento del pie al caminar, ya que es un elemento rígido y no elástico, sufre un par en sentido negativo del eje Z. Vemos como ejemplo la gráfica del momento en Z para una velocidad de 90 °/s y para tres pasos del pie derecho.

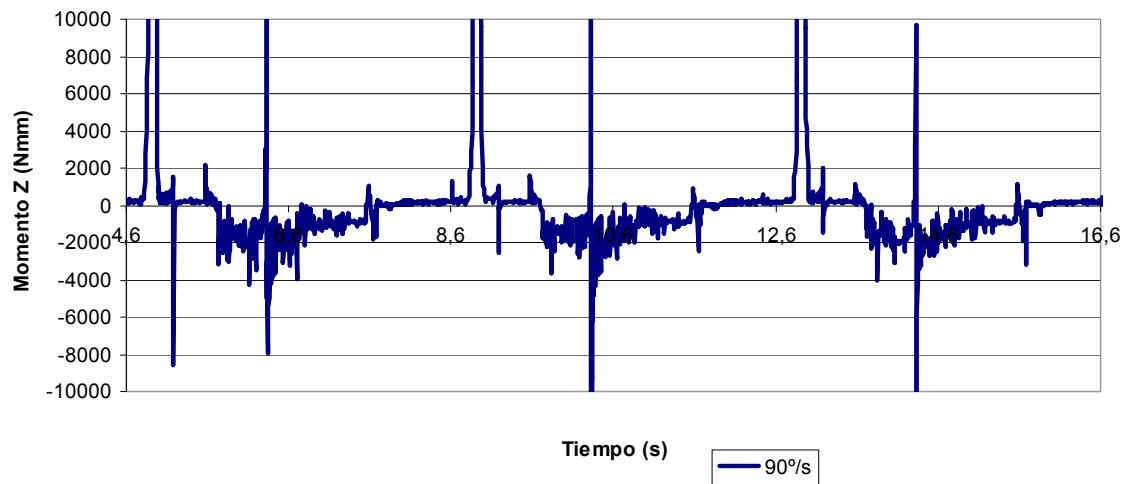


Figura 5.2.30 Momento en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 59

5.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 61

El marker 61 pertenece al elemento pie y se localiza en el punto de articulación con el peroné. Este marker pertenece al igual que el marker 59 al pie. El pie es un elemento que es un sólido rígido, esto supone que para los valores de posición con respecto al tiempo la relación entre ambos puntos sea la misma, sólo dependiendo de la posición del pie. Mientras que para la velocidad traslacional y angular y la aceleración traslacional y angular con respecto a los del marker 59, serán muy parecidos con apenas alguna diferencia. Por ello dado que no suponen una gran fuente de información, para este marker pasamos a estudiar los parámetros que sí varían, la fuerza y el momento.

Parámetro: Fuerza

En este parámetro vamos a ver las fuerzas que sufre el elemento peroné en su punto de articulación con el pie. Estas fuerzas serán las reacciones que sufre el pie al caminar, que se transmiten al peroné por esta articulación. El pie en el marker de esta misma articulación estará sufriendo los mismos esfuerzos pero de sentido contrario.

▪ Eje X:

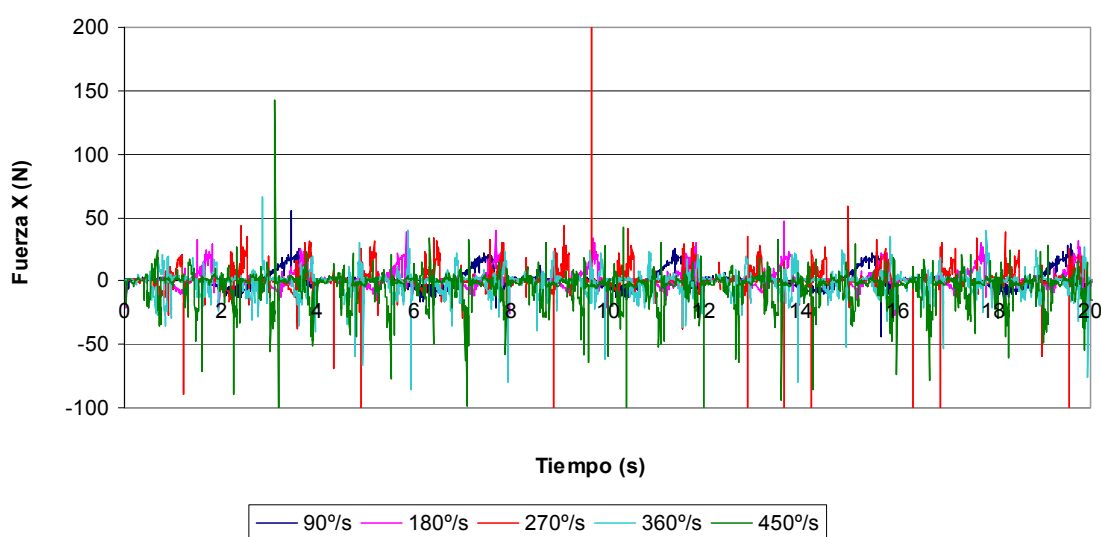


Figura 5.3.1 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 61

En la gráfica vemos como el valor de la fuerza soportada por el marker a lo largo del tiempo tendrá una evolución parecida para las distintas velocidades de giro de motor. Para verlo con más claridad estudiamos las gráficas por separado de cada una de las velocidades de giro de motor durante 3 ciclos completos de pasos.

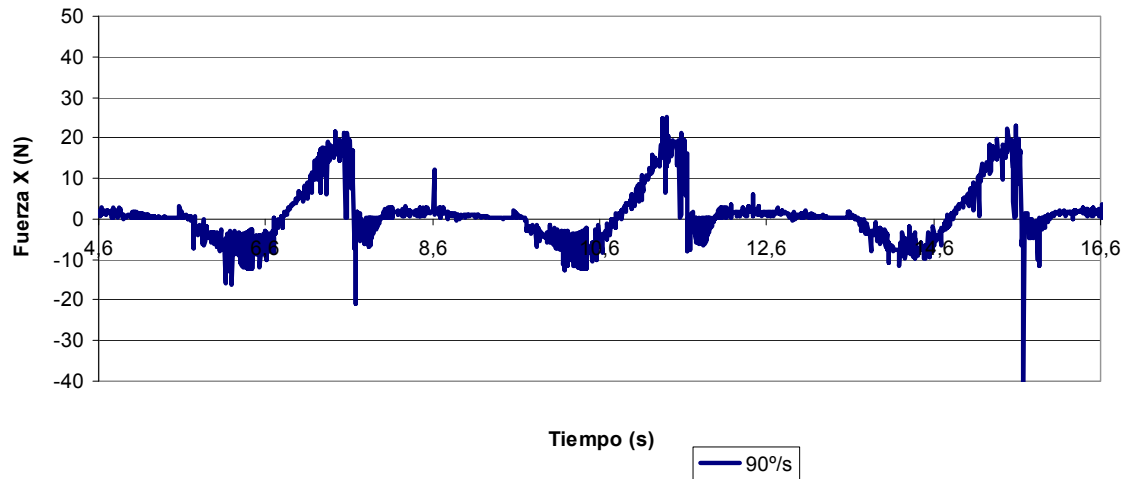


Figura 5.3.2 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61

En todas las gráficas vemos un comportamiento similar. Primero aumenta la fuerza en sentido negativo (hacia atrás), esto es debido a que el robot está ligeramente inclinado hacia atrás. Después la fuerza pasa a tener sentido positivo (hacia delante) ya que el robot se inclina ligeramente hacia delante buscando el momento de apoyar el pie izquierdo. Los valores máximos para todas las velocidades de giro del motor se mantienen alrededor de los 20 N.

▪ Eje Y:

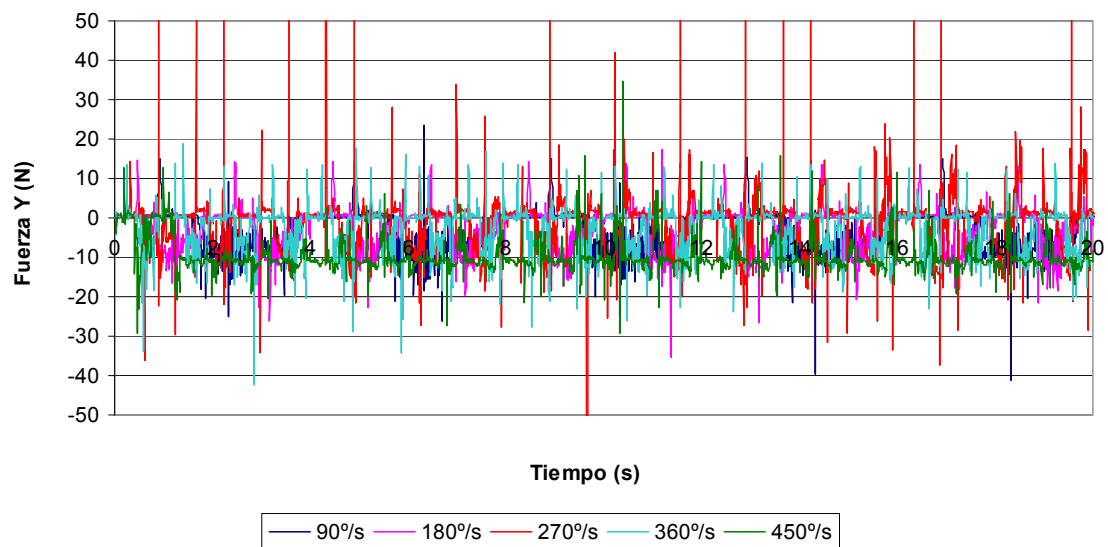


Figura 5.3.3 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 61

Para el eje Y del parámetro Fuerza, vemos como los valores serán parecidos entre las curvas con distintas velocidades de giro de motor. También vemos como son

valores pequeños. Esta fuerza será la que soporte el marker 61 en la dirección horizontal, y será causada por la inclinación hacia los lados del robot.

▪ **Eje Z:**

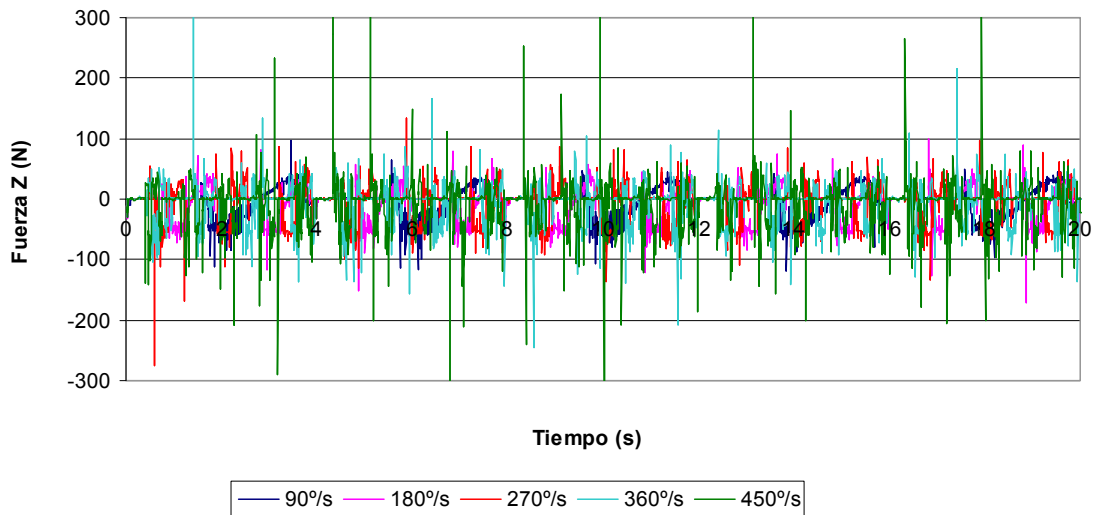


Figura 5.3.4 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 61

El eje Z será interesante para el estudio en este parámetro ya que se verá reflejado el efecto del peso en la reacción producida en este marker, y que se verá transmitida al resto del robot.

Vemos cada curva por separado para un periodo de 3 pasos.

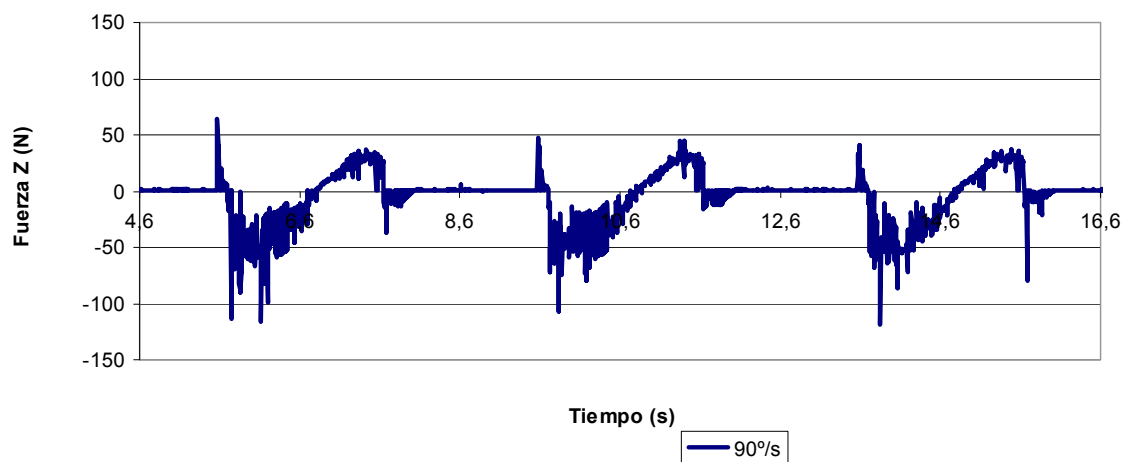


Figura 5.3.5 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61

Podemos ver que en una primera parte del ciclo de cada paso se dan valores negativos, serán debidos al peso del robot apoyándose sobre el pie. En una segunda parte de cada paso vemos como los valores cambian hacia el sentido positivo, en esta parte será la fuerza que hace que el robot eleve la pierna izquierda y que supone que el robot sea “lanzado hacia arriba y hacia delante”. Pero en el momento en que el robot se balancea hacia delante perdiendo esa fuerza y acercando el pie izquierdo a la plataforma, esta fuerza positiva desaparece.

En las gráficas podemos ver también como los valores de la fuerza con la que presiona el robot al marker debido al peso es de aproximadamente -50 N.

Parámetro: Momento

▪ Eje X:

Estudiamos a continuación el momento que se produce en el marker en el eje X. En este eje el momento que se producirá será el debido al peso del robot, que debido a que el robot tenderá a inclinarse hacia el lado en que el pie esté en vuelo durante el paso, provocará un esfuerzo en este punto.

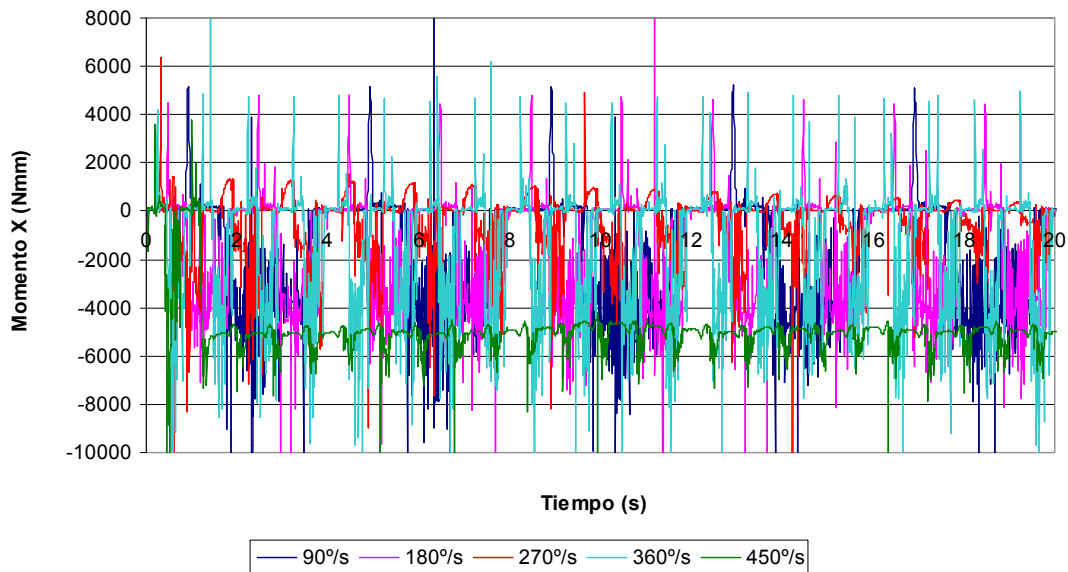


Figura 5.3.6 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 61

En la gráfica de las curvas conjuntas para distintas velocidades de giro del motor no es fácil ver la similitud entre las curvas, pero vemos cada curva por separado para 3 pasos completos en las siguientes figuras.

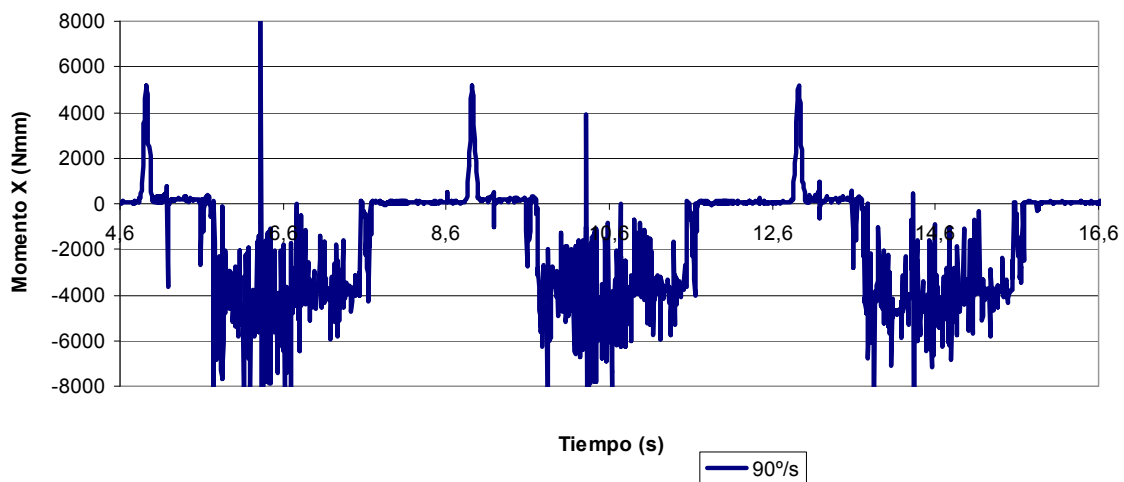


Figura 5.3.7 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61

A pesar de algunas diferencias obvias entre las curvas, podemos ver como todas las gráficas tienen una evolución parecida. En todas ellas en el momento en que el pie derecho (que es al que pertenece este marker) aparecen esos valores negativos de esfuerzo que duran todo el tiempo que el pie derecho está apoyado. Esto era de esperar, ya que como hemos comentado, cuando el pie contrario (en este caso el izquierdo) se encuentra en vuelo todo el peso del robot recae sobre el pie de apoyo. Esto supone que al inclinarse hacia el lado opuesto del pie de apoyo se produzcan esfuerzos flectores en el sentido negativo del eje X. Los valores máximos en valor absoluto que alcanza el robot debido a este esfuerzo es de aproximadamente 4000 Nmm en sentido negativo.

▪ **Eje Y:**

En el eje Y veremos los esfuerzos flectores que soporta el robot en este marker.

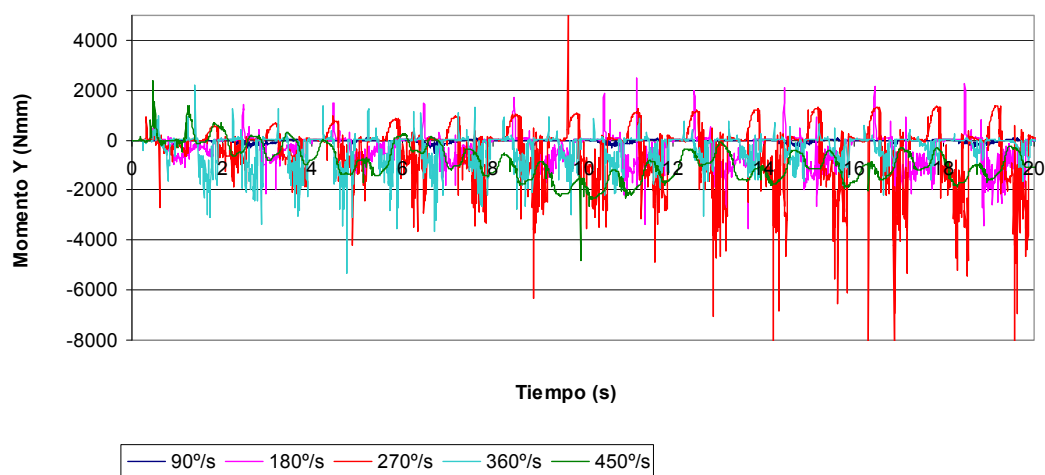


Figura 5.3.8 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 61

Del mismo modo que en casos anteriores vemos las curvas por separado.

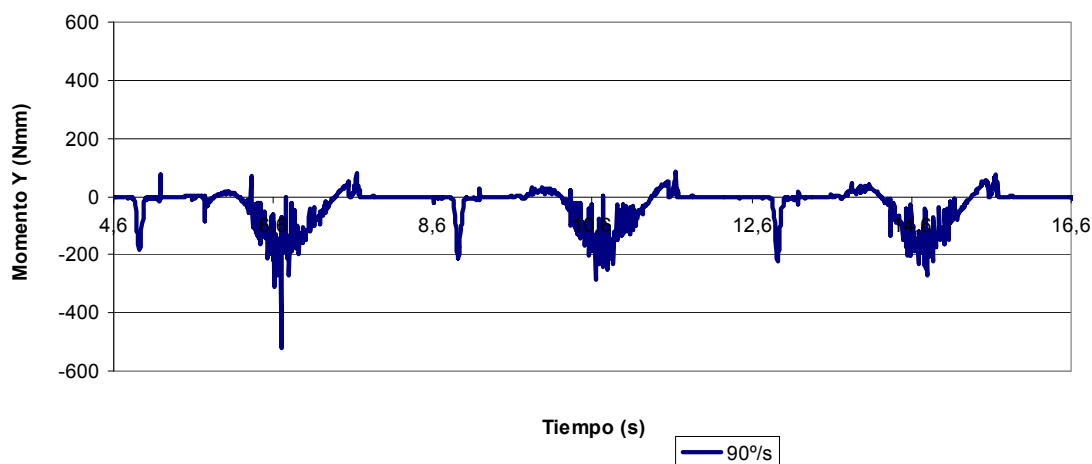


Figura 5.3.9 Momento en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61

Al igual que en el caso de estudio en eje X, en el eje Y los esfuerzos se producirán en el tiempo en que el pie esté apoyado en suelo. Existe en todos los casos un momento flector en el sentido opuesto al giro de la pierna alrededor del pie. Es un esfuerzo que debe vencer el robot para conseguir dar un paso cada vez.

Es interesante señalar que en este caso los valores del esfuerzo son menores que en el caso del eje X, esto se debe a que las fuerzas que provocan el momento en X debido al peso son mayores. Y además son aproximadamente iguales ya que dependen del peso que es constante. Sin embargo en este caso podemos ver un ligero aumento de los valores a medida que aumenta la velocidad de giro de del motor, aumentando también la velocidad al caminar del robot. Esto supone que la aceleración deberá ser mayor al moverse lo mismo pero en menos tiempo. Lo que supondrá un mayor esfuerzo sobre este punto concreto del robot.

▪ Eje Z:

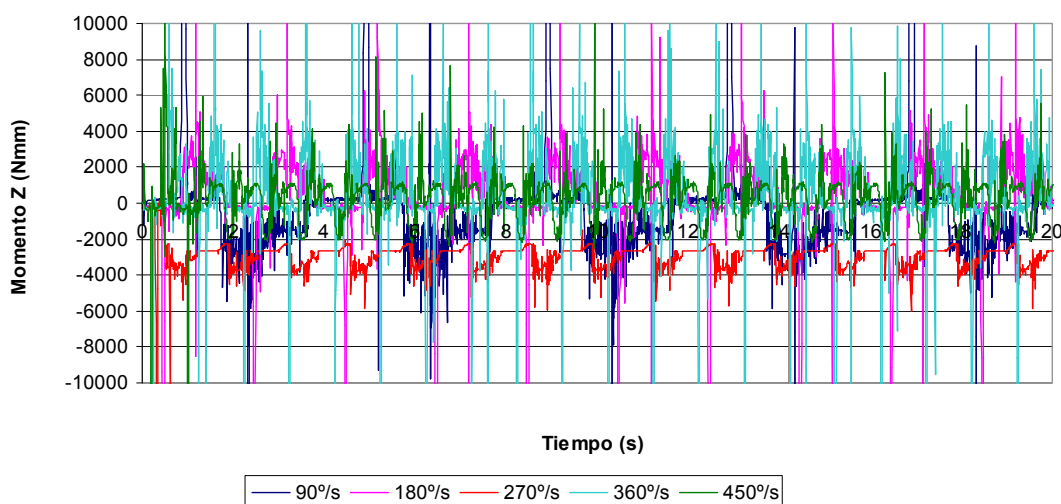


Figura 5.3.10 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 61

En el eje Z para este parámetro podemos ver los esfuerzos que se producen en este marker con cada paso del robot. Para verlo con más claridad vemos cada curva por separado.

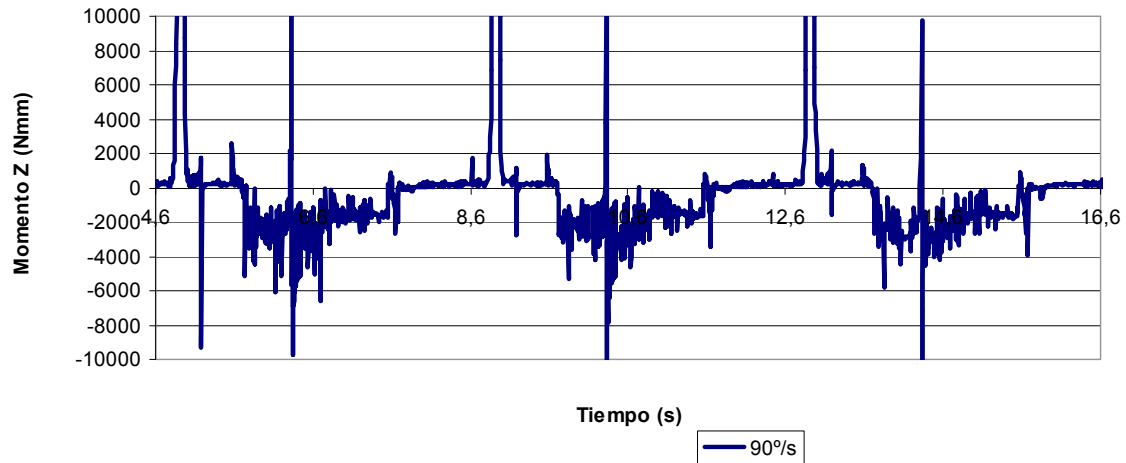


Figura 5.3.11 Momento en Y para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 61

Las curvas de este parámetro en función del tiempo nos dejan ver que los valores de los esfuerzos son de un rango parecido al de los valores del momento en el eje X. En este caso estos esfuerzos se producen debido al pivotamiento del cuerpo del robot sobre el pie de apoyo con cada paso. Esto como vimos para anteriores markers produce que el robot no camine recto si no que se desvíe, y en el caso de los esfuerzos hace que el robot se “retuerza” debido al pivotamiento.

5.4 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 66

El marker que estudiaremos a continuación pertenece a la zona de la rodilla. El elemento al que pertenece es a la tibia como hemos visto anteriormente. Se encuentra en la articulación entre la tibia y el fémur. Este marker nos permitirá conocer los comportamientos y esfuerzos que se producen en esta zona.

En el estudio de este marker incluiremos también el estudio de esfuerzos del marker 67, que es el marker perteneciente también al elemento Tibia, pero que estará situado en la cara opuesta al marker 66 ya que se encuentra en la unión de la tibia y el elemento Rodilla.

Parámetro: Movimiento traslacional

Estudiamos primero el movimiento ó la posición de este marker a lo largo del total del tiempo de la simulación.

▪ Eje X:

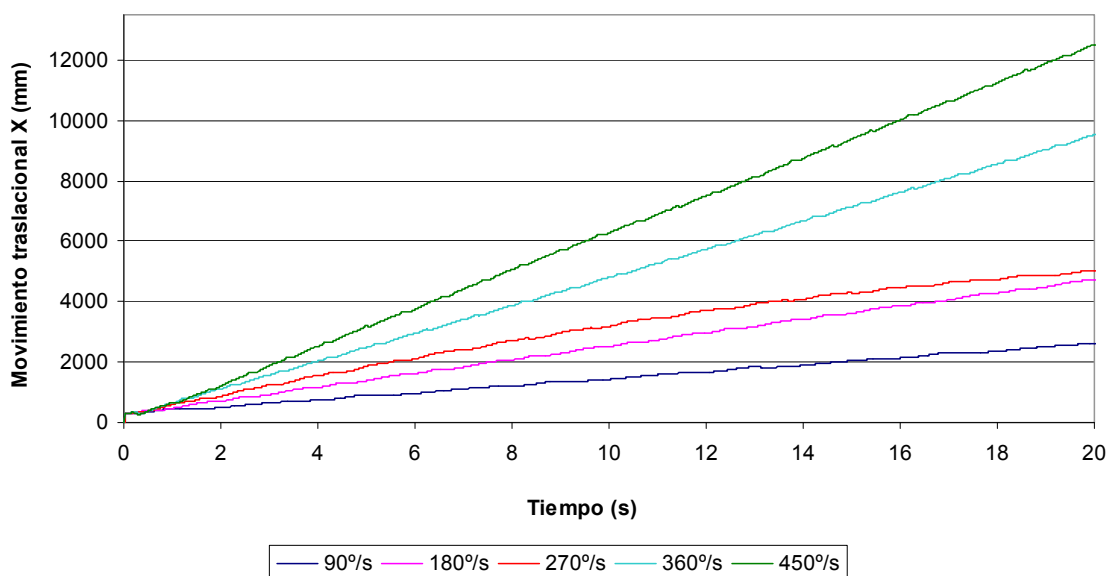


Figura 5.4.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

El marker 66 recorrerá una distancia muy similar a la del resto de los markers, diferenciándose en apenas unos pocos centímetros dependiendo de la posición en la que el robot acaba del ciclo del paso que estaba realizando.

▪ Eje Y:

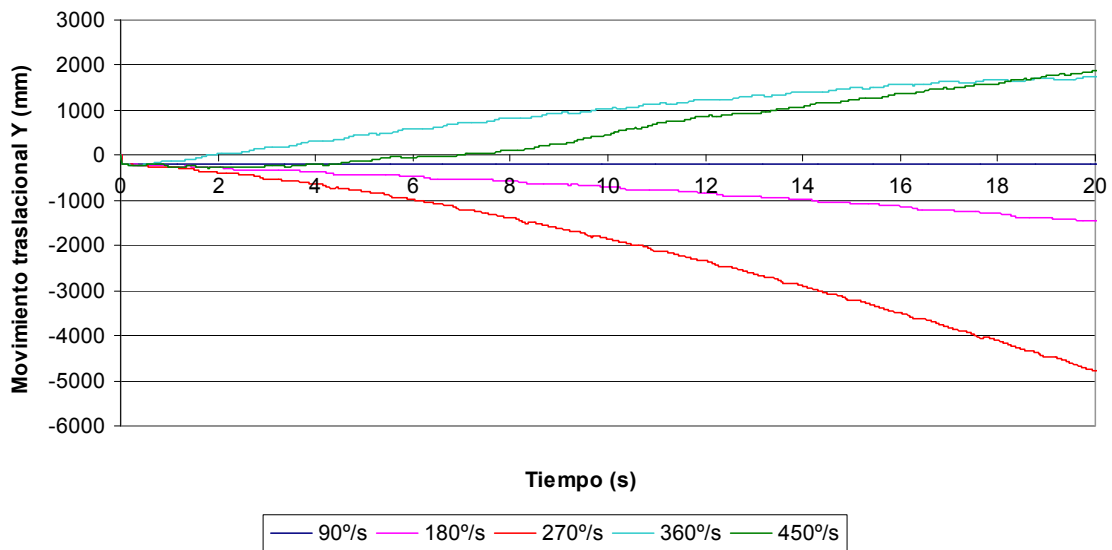


Figura 5.4.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

En el caso del eje Y ocurre lo mismo que en X, y es que no habrá apenas diferencia entre la posición que ha recorrido el marker 66 con respecto a la de los otros markers estudiados. El robot además es rígido y no tiene articulaciones que permitan girar sus piernas en torno al eje X, con lo que la rodilla se mantendrá en la misma posición con respecto a los otros markers.

▪ Eje Z:

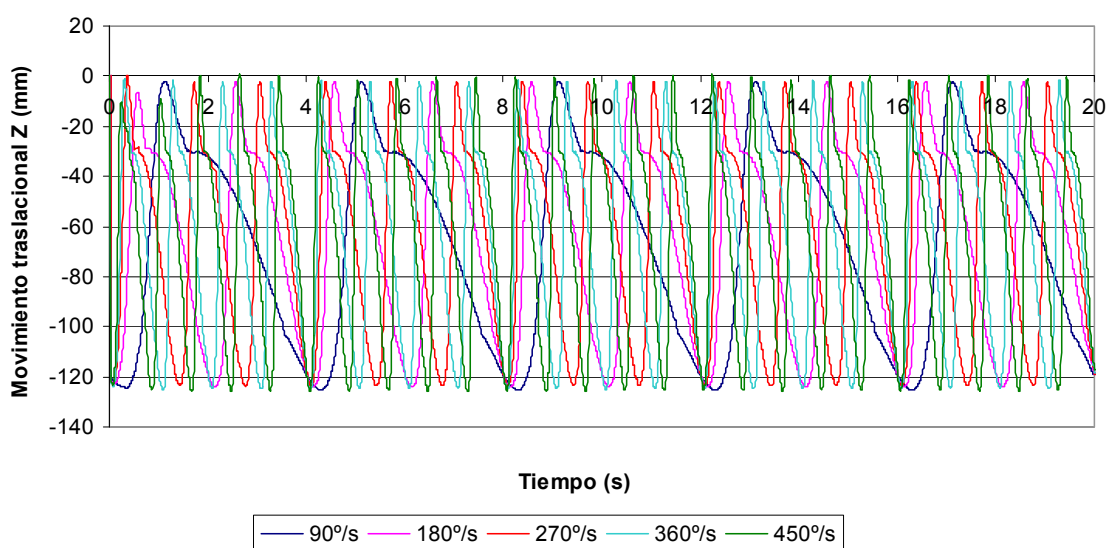


Figura 5.4.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

En el caso del eje Z sí existirán diferencias en las curvas de movimiento traslacional para las diferentes velocidades de giro del motor, con respecto a otros markers.

En primer lugar se aprecia como diferencia los valores entre los que está comprendido, y es que este marker está situado más cerca del origen de coordenadas del robot, que por ejemplo los pies ó la manivela. Está situado ligeramente por debajo del origen de coordenadas.

En segundo lugar podemos observar la diferencia entre la forma de las curvas para los distintos markers. Con el marker 89 obviamente las curvas son distintas, a pesar de la similitud que existe en que ambos puntos suben y bajan cíclicamente. El movimiento en el eje Z de la rodilla tendrá mayor similitud con el de los markers estudiados de los pies. Ambos tienen una amplia subida y bajada, sin embargo la rodilla realiza un movimiento más prolongado antes de terminar volviendo a su posición de origen entre paso y paso. El pie permanece más tiempo inmóvil mientras está fijo en suelo, mientras que la rodilla termina en su punto más bajo una vez que el pie izquierdo está apoyado en el suelo. Y es en este momento cuando el pie derecho vuelve a alzarse para realizar el paso realizando de nuevo el ciclo del paso.

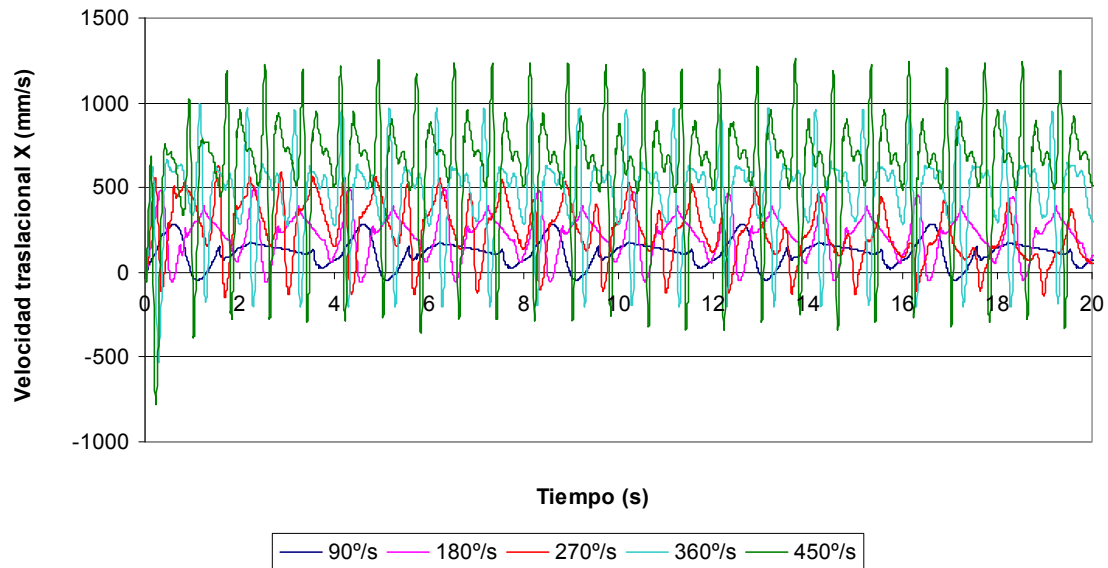
Parámetro: Velocidad traslacional**▪ Eje X:**

Figura 5.4.4 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

En la gráfica, debido al gran número de datos y la diferencia de pasos que realiza el robot en las diferentes simulaciones debido a las diferentes velocidades de giro del motor, será difícil ver con claridad la forma de las mismas, con lo que pasamos a ver tres pasos completos para cada una de las distintas velocidades de giro de motor.

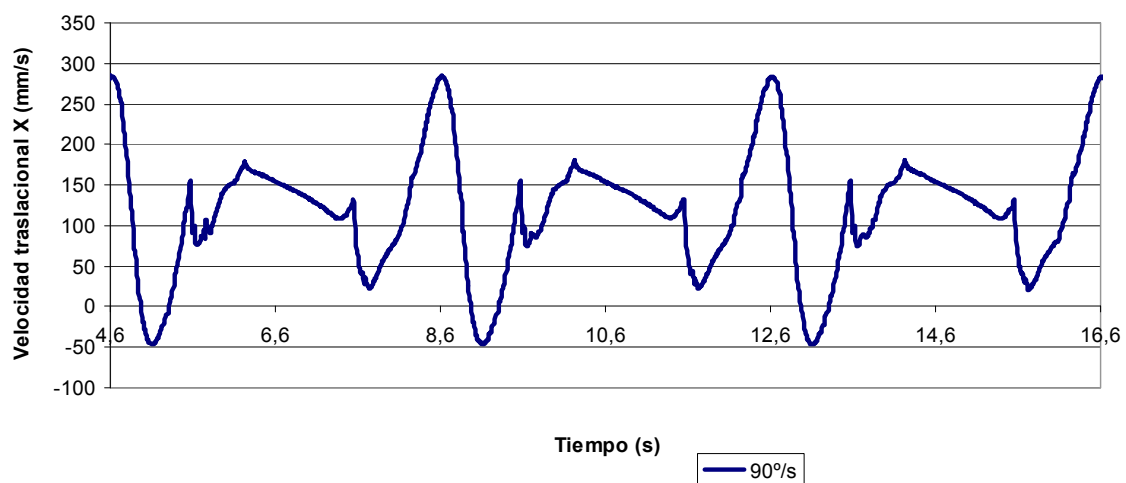


Figura 5.4.5 Velocidad traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

En las gráficas podemos ver como en todos los casos la curva tendrá la misma forma, sin embargo como podemos ver tendrá diferentes valores máximos y mínimos dado que a mayores velocidades de giro del motor el robot se moverá a mayor velocidad.

▪ **Eje Y:**

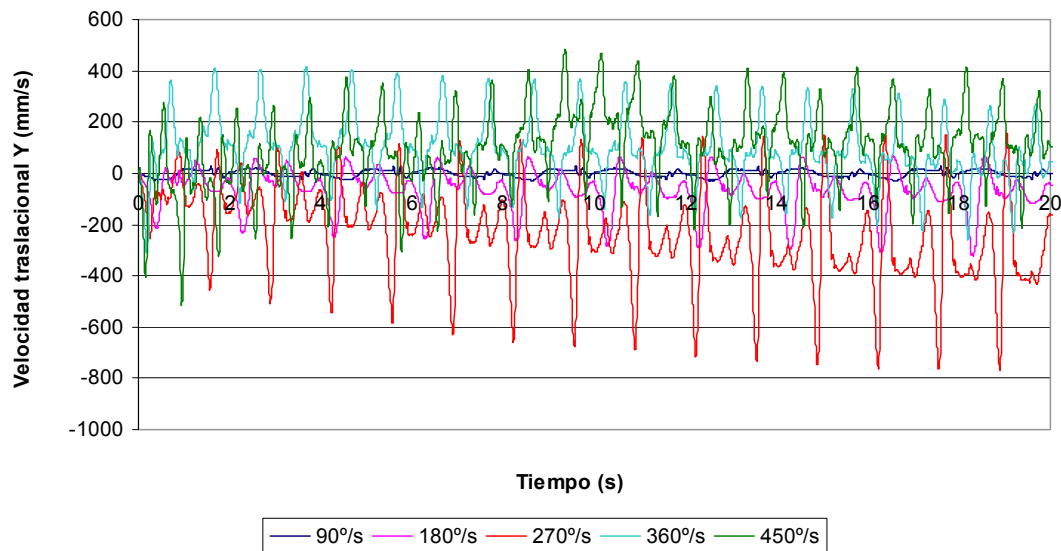


Figura 5.4.6 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

Como ya he comentado anteriormente debido al hecho de que el robot se desvía hacia izquierda o derecha dependiendo de la velocidad de giro del motor. Esto supone que en la simulación en que se produce una desviación mayor (que es la que tiene como velocidad de giro 270 °/s) los valores negativos aumentan en gran medida, lo que se debe a que el robot va girando hacia la derecha (orientación negativa del eje Y).

▪ Eje Z:

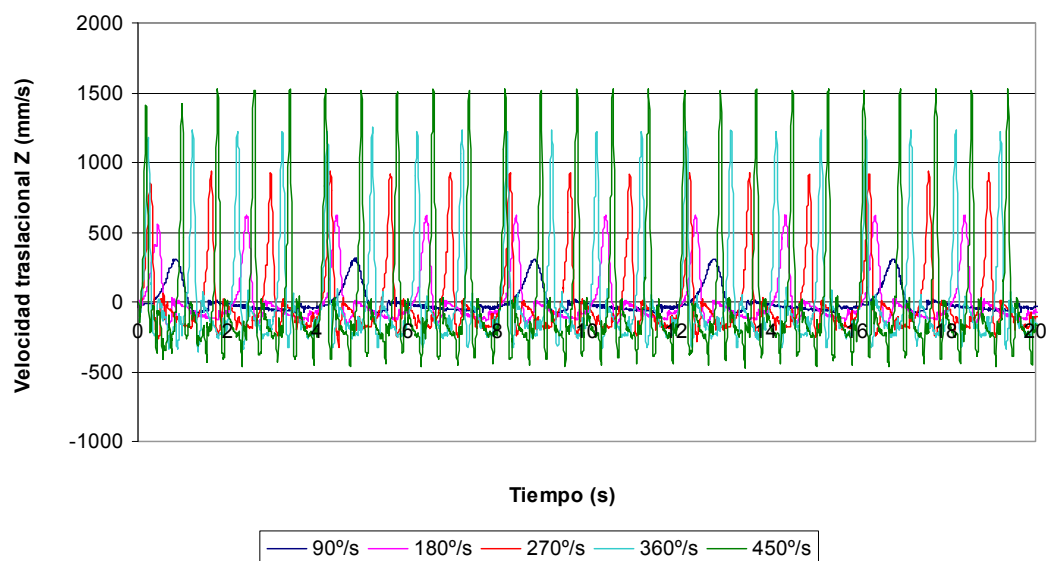


Figura 5.4.7 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

Para ver con más claridad las curvas para cada una de las velocidades de giro del motor, estudiamos las gráficas por separado para tres pasos completos de cada pie.

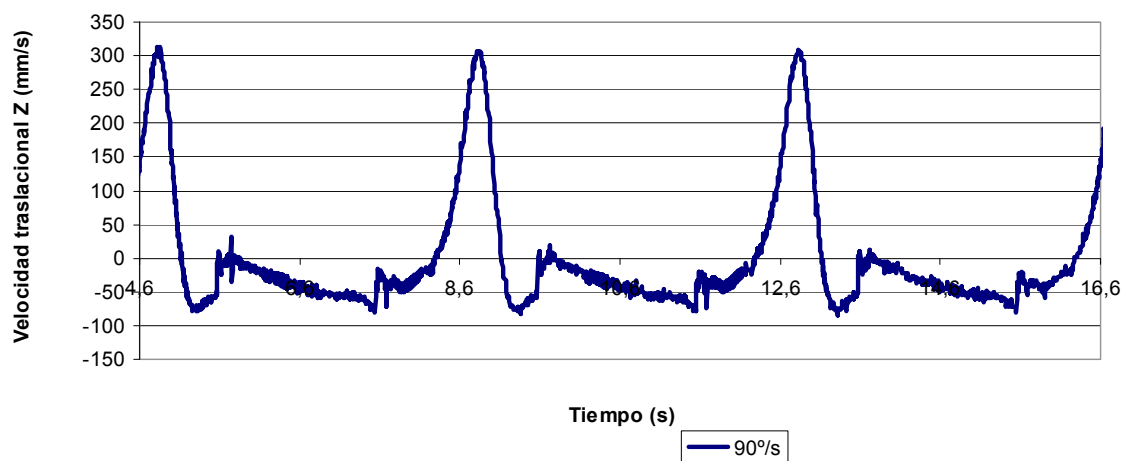


Figura 5.4.8 Velocidad traslacional en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

Como podemos ver en las gráficas la curva que se da para cada una de las velocidades de giro del motor es muy parecida, pero variando considerablemente sus valores máximos y mínimos. Estos como ya hemos comentado anteriormente aumentarán en su valor absoluto al aumentar la velocidad de giro del motor al moverse más rápidamente el robot.

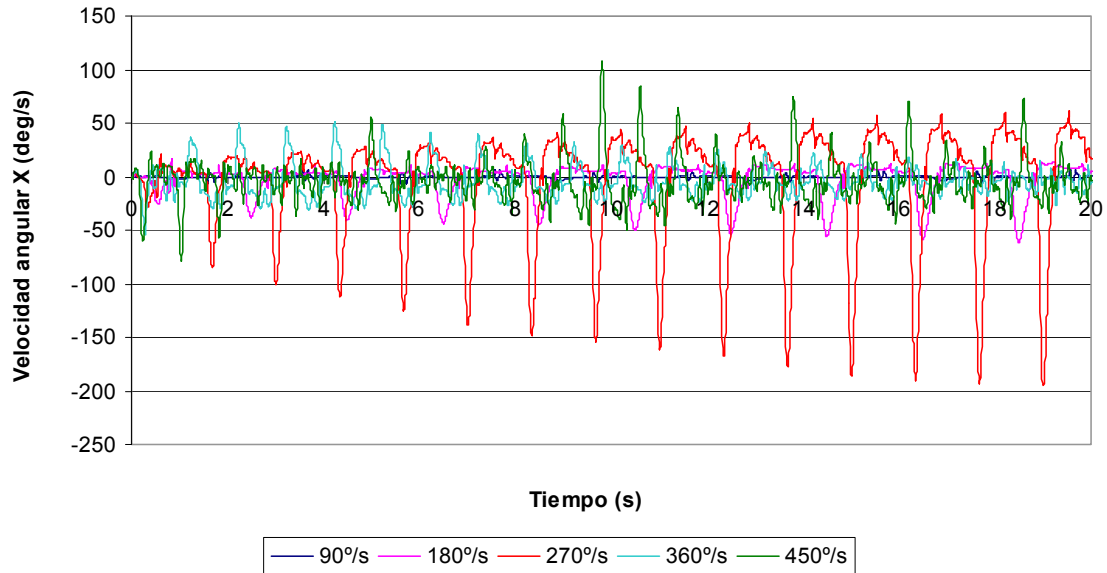
Parámetro: Velocidad angular**▪ Eje X:**

Figura 5.4.9 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

Lo primero que debemos comentar de la velocidad angular en el eje X es que nos da la información del balanceo e inestabilidad del robot en su caminar. Podemos ver como a mayor velocidad aumentará esa inestabilidad.

Lo primero que podemos ver en las gráficas es que en este marker la velocidad angular será muy baja, ya que apenas gira. También vemos, como ya hemos comentado anteriormente, que para el caso de la velocidad de giro del motor de 270 °/s el parámetro que estamos estudiando aumenta el valor de su máxima velocidad angular a lo largo del tiempo. Como ya hemos comentado esto se debe a que al girar el robot a lo largo de su recorrido los valores de algunos parámetros cambiarán debido a que la descomposición entre los ejes X e irá cambiando debido al giro del robot.

▪ Eje Y:

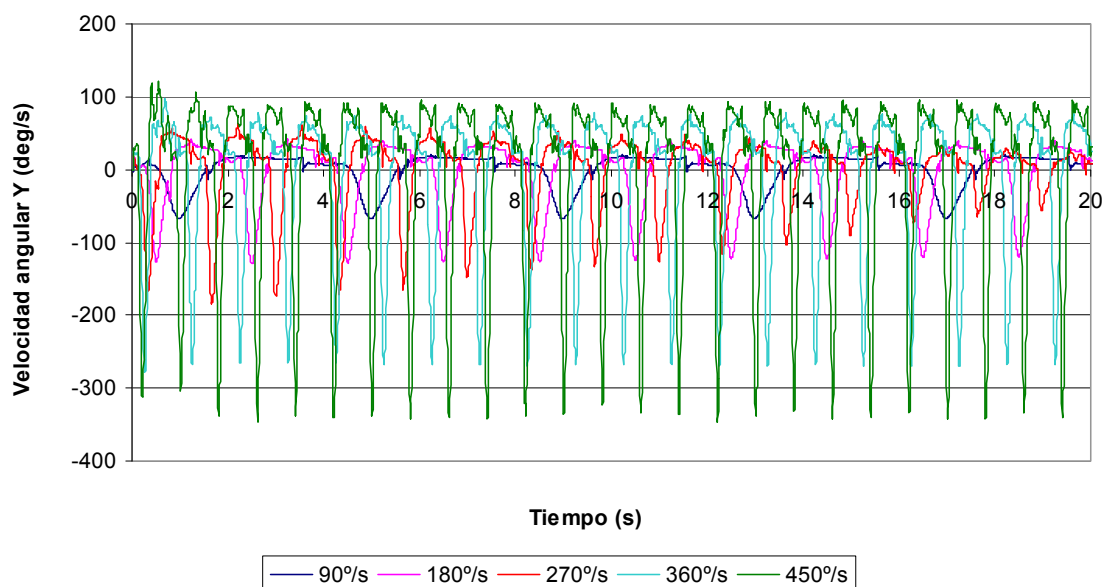


Figura 5.4.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker
66

En la gráfica de la velocidad angular para el eje Y podemos con claridad la similitud de la forma de las curvas únicamente teniendo como diferencia el hecho de que a mayor velocidad de giro del motor mayor es el número de pasos realizados por el robot en un mismo tiempo, por lo que las curvas de mayor velocidad de giro del motor cada paso tendrá mayor aspecto de “pico”.

También podemos ver como diferencia que debido a una mayor velocidad de giro del motor los valores máximos para la velocidad angular en Y aumentan. También podemos ver, particularmente en la curva con velocidad angular de 270 %/s, como a medida que el robot realiza su recorrido los valores máximos y mínimos van disminuyendo en valor absoluto. Esto se debe a que el robot gira, y al contrario que para el eje X, en este caso debido al cambio de la posición del robot con respecto a la posición de los ejes y su correspondiente descomposición de la velocidad angular en los ejes el valor de la velocidad angular en Y disminuye.

De los tres ejes espaciales será Y el de mayor relevancia para la velocidad angular, ya que será este eje el eje de movimiento circular en el que gira la rodilla en su movimiento de vaivén para que el robot pueda caminar.

▪ Eje Z:

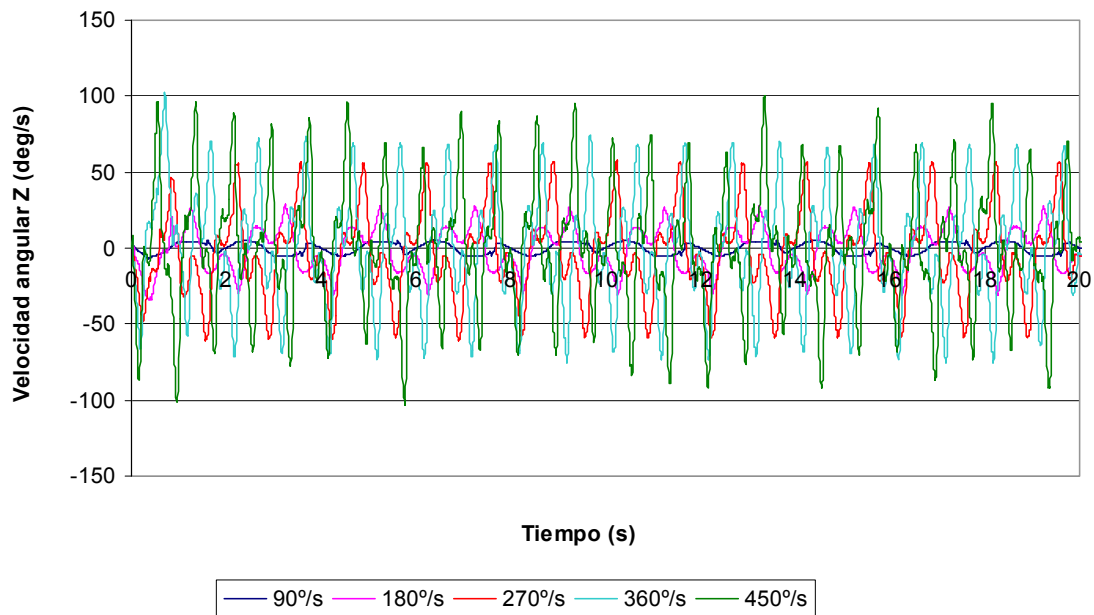


Figura 5.4.11 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

Vemos para la velocidad angular en el eje Z las gráficas de cada una de las velocidades de giro del motor para unos pocos pasos del pie derecho.

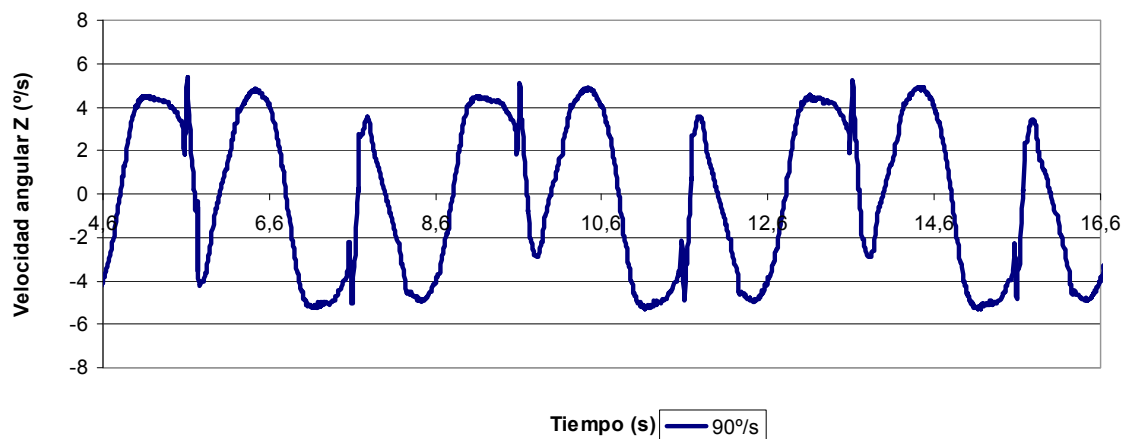


Figura 5.4.12 Velocidad angular en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

Vemos para las distintas gráficas (en el Anexo A5) como todas ellas comparten una forma muy similar. La velocidad angular en el eje Z para este nos da información

sobre como gira levemente hacia izquierda y derecha con cada paso que da rotando levemente sobre el pie de apoyo para ello.

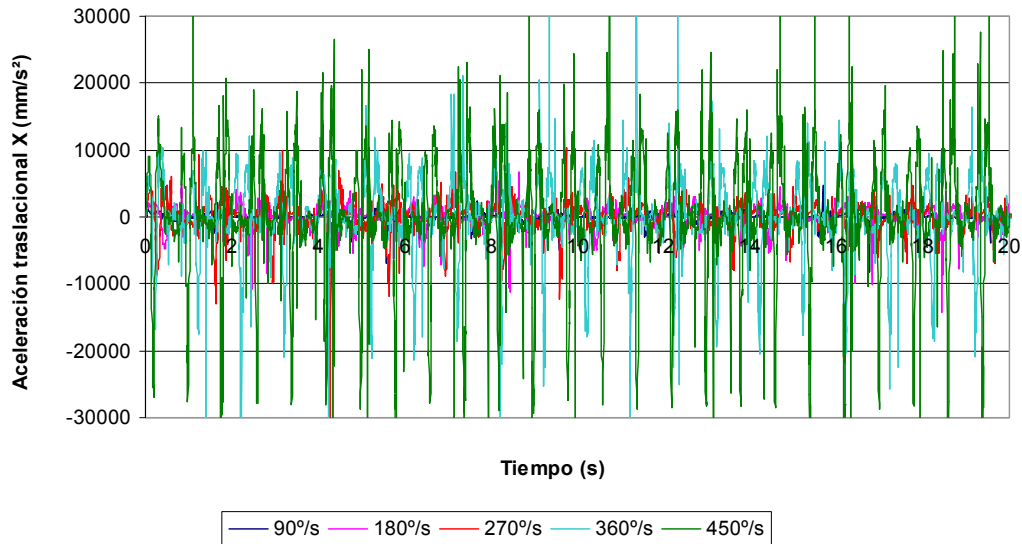
Parámetro: Aceleración traslacional**▪ Eje X:**

Figura 5.4.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

Como hemos visto en más ocasiones en las gráficas se puede observar como la forma de las mismas es muy parecida, teniendo como principal diferencia que al aumentar la velocidad de giro del motor la aceleración en el eje X también aumenta.

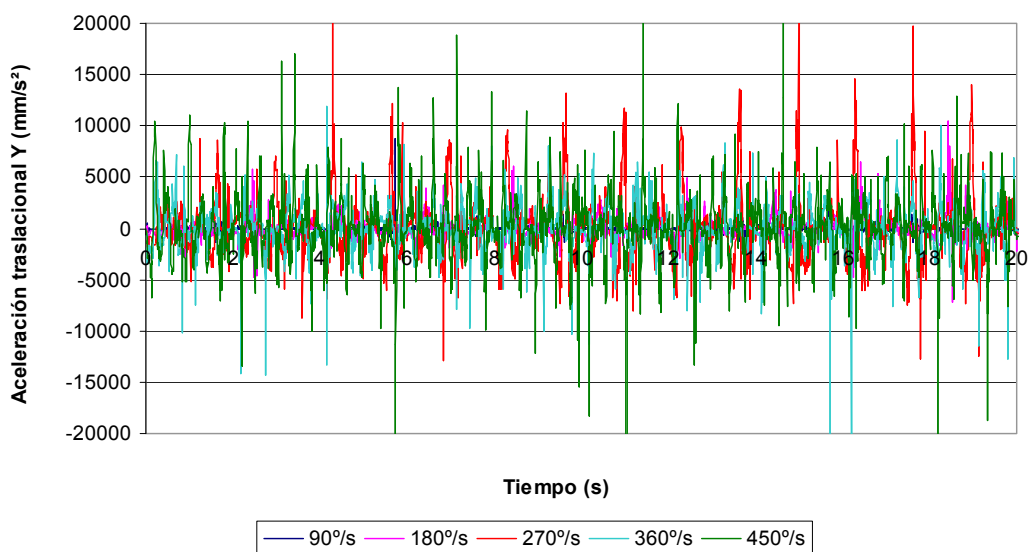
▪ Eje Y:

Figura 5.4.14 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

Debido a lo difícil que es ver en la gráfica las curvas para cada una de las velocidades de giro del motor, vemos cada una de ellas por separado para un intervalo del tiempo determinado en el Anexo 3 apartado 3.

La aceleración del eje Y nos indica como de rápido varía la velocidad traslacional en el eje Y. Esto supone que a través de este parámetro podemos ver la inestabilidad del robot en su balanceo hacia los lados.

Las gráficas no muestran grandes diferencias en su forma pero sí podemos ver como al aumentar la velocidad de giro del motor aumenta considerablemente la aceleración en este eje, con lo que a medida que aumentemos la velocidad del motor estaremos haciendo que el robot se balancee sobre su pie de apoyo hacia izquierda y derecha con mayor fuerza.

▪ Eje Z:

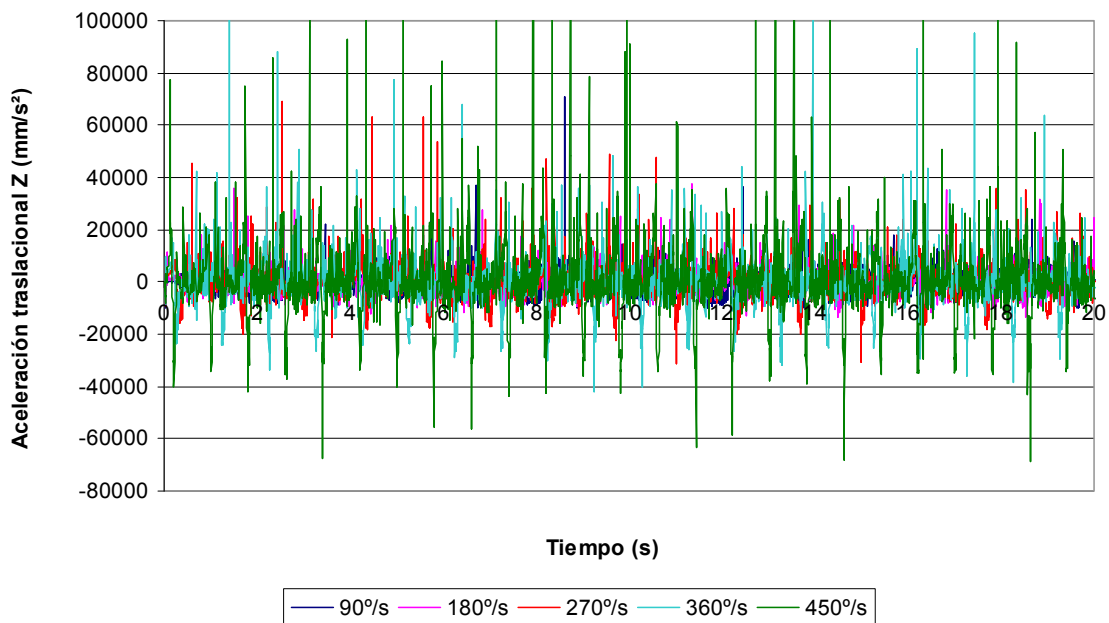


Figura 5.4.15 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

Parámetro: Aceleración angular

▪ Eje X:

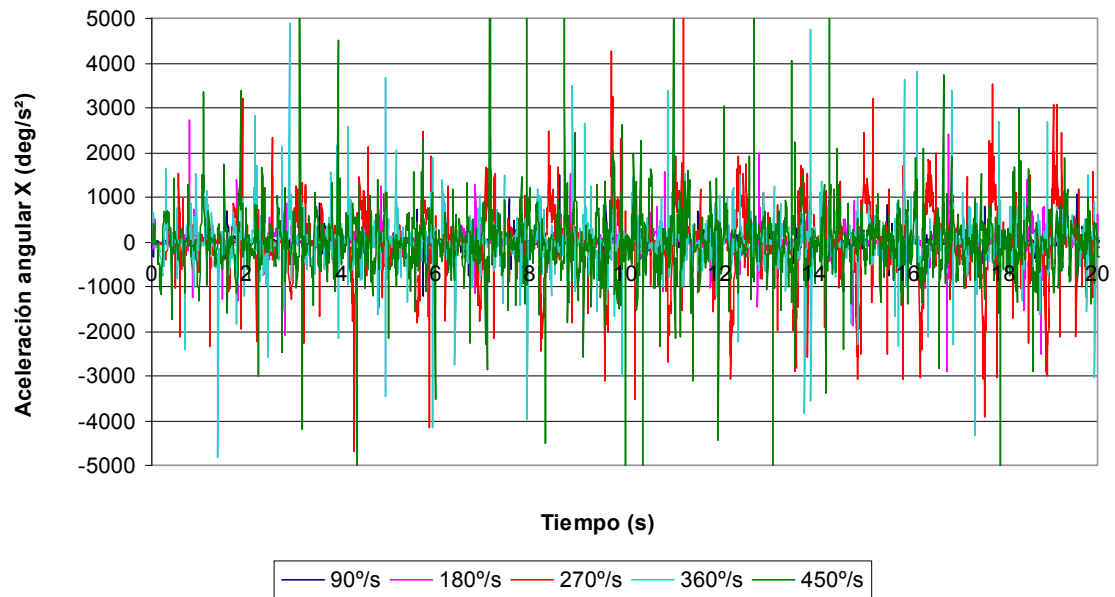


Figura 5.4.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

▪ Eje Y:

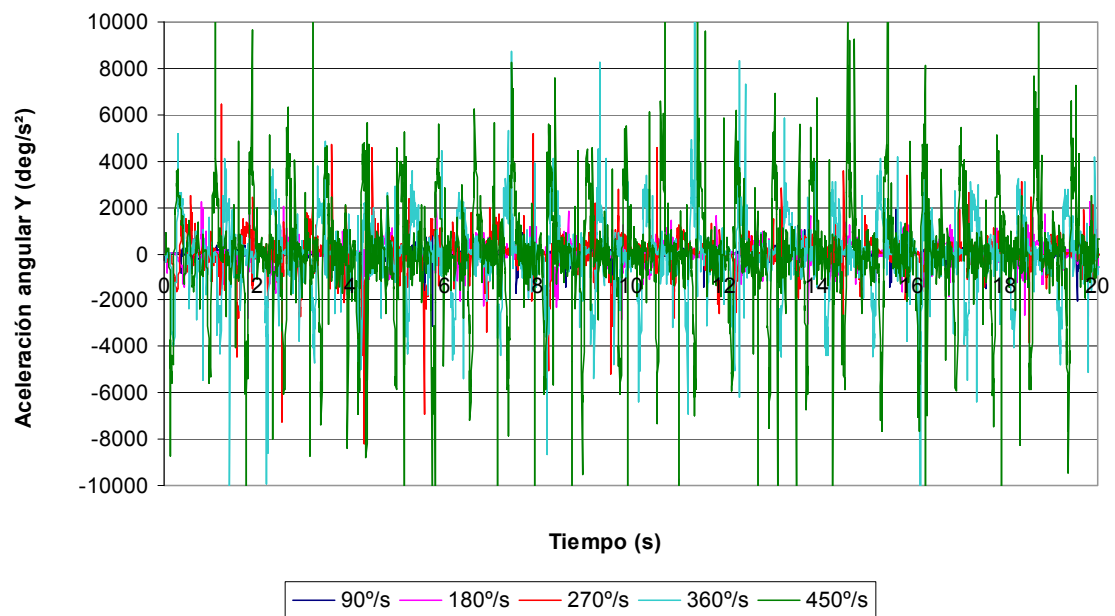


Figura 5.4.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

▪ Eje Z:

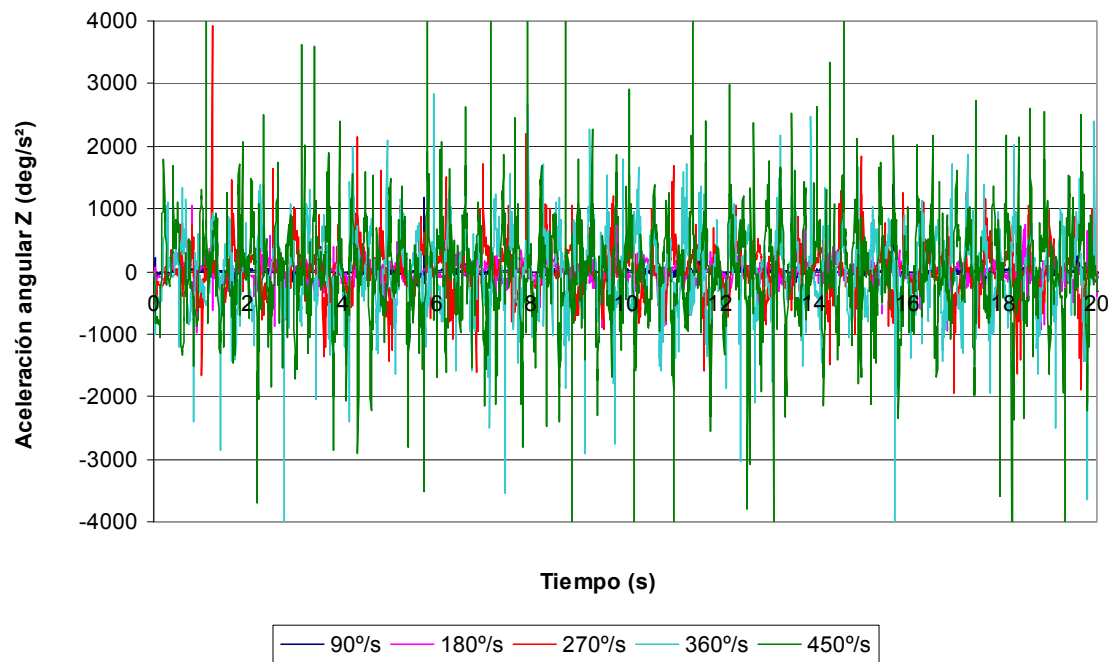


Figura 5.4.18 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

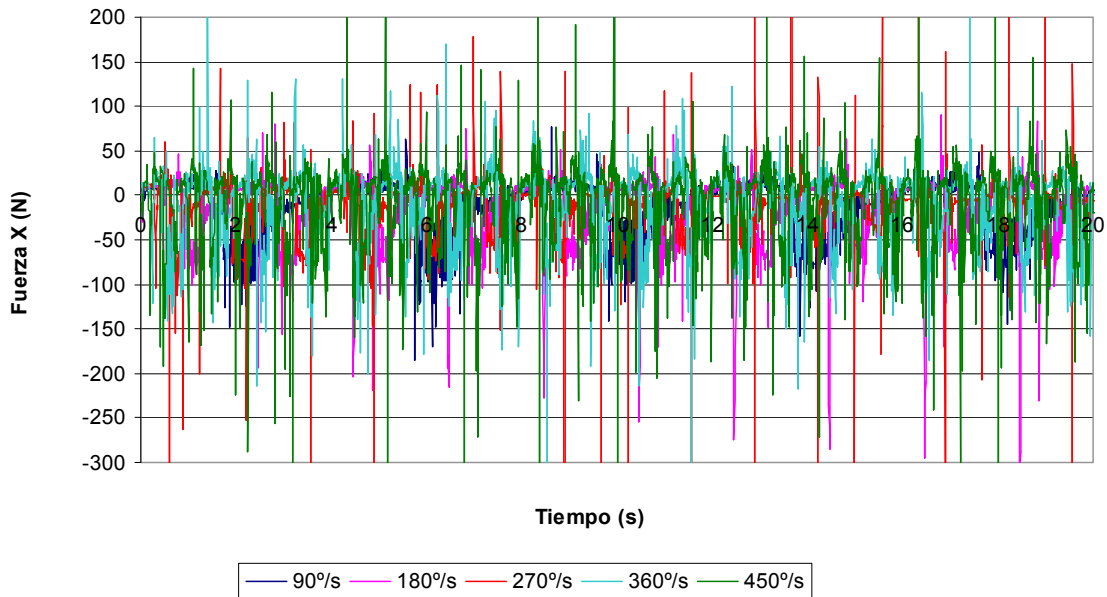
Parámetro: Fuerza**▪ Eje X:**

Figura 5.4.19 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

Debido al gran número de datos y a los picos que el programa devuelve en la simulación, vemos las gráficas para la fuerza en dirección X que sufre el marker.

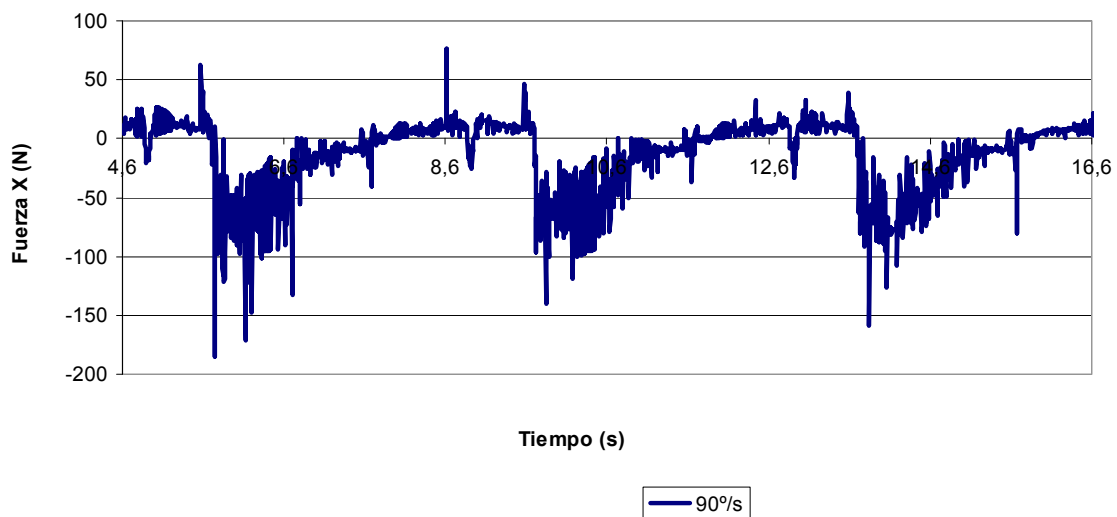


Figura 5.4.20 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

En las gráficas podemos ver como todas ellas tienen una forma similar. Existe al comienzo del paso con el pie derecho apoyado, un intervalo en el que se dan fuerzas en

el eje X con sentido negativo. Esta fuerza se debe a que el peso del robot inclina a la tibia hacia delante, hasta un punto en el que (debido a la unión de la tibia con la rodilla, y de la rodilla al peroné) se restringe su movimiento impidiéndole seguir moviéndose hacia delante. Esto supone que se produzcan unas reacciones en este punto. La principal de estas reacciones es esta fuerza de dirección X y sentido negativo, es decir en la dirección del movimiento, pero en sentido contrario al mismo impidiéndole seguir girando alrededor del pie.

En un segundo periodo existe una pequeña resistencia sobre el movimiento de este punto en su movimiento de giro hacia atrás mientras el pie izquierdo está en vuelo, que supone una pequeña fuerza en sentido positivo del eje X, ya que la rodilla en este momento está girando hacia atrás para completar el paso.

▪ Eje Y:

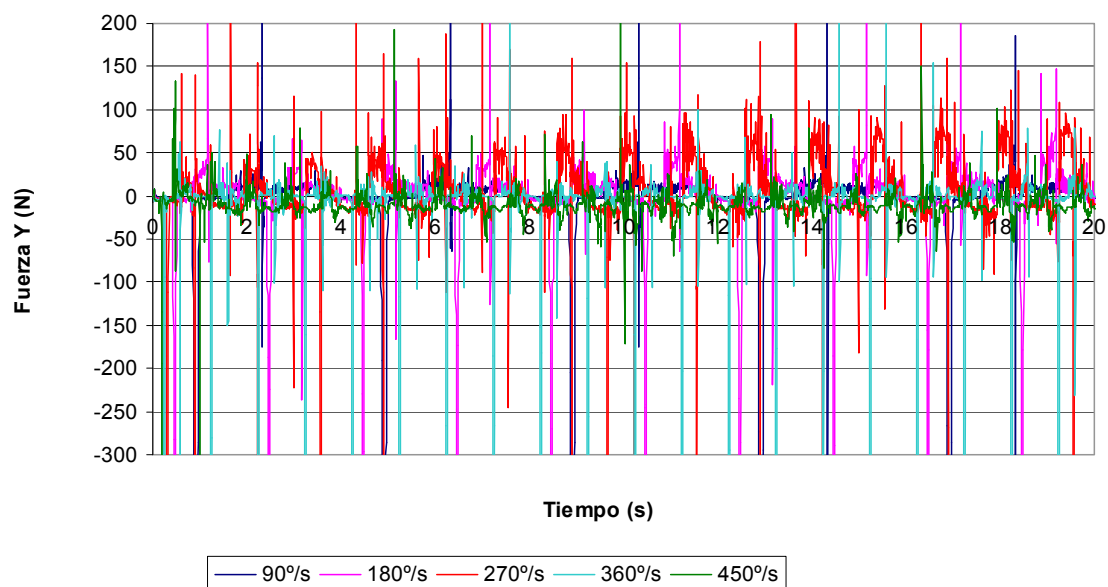


Figura 5.4.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

En el eje Y se dan fuerzas en sentido positivo, que se deben a que al estar el robot únicamente apoyado en el pie derecho (en el caso que estamos estudiando), el peso del robot provoca unas fuerzas, que una vez descompuestas, en el eje Y “tiran” del robot hacia dentro, ya que el robot es simétrico y su centro de masas está en el centro.

▪ Eje Z:

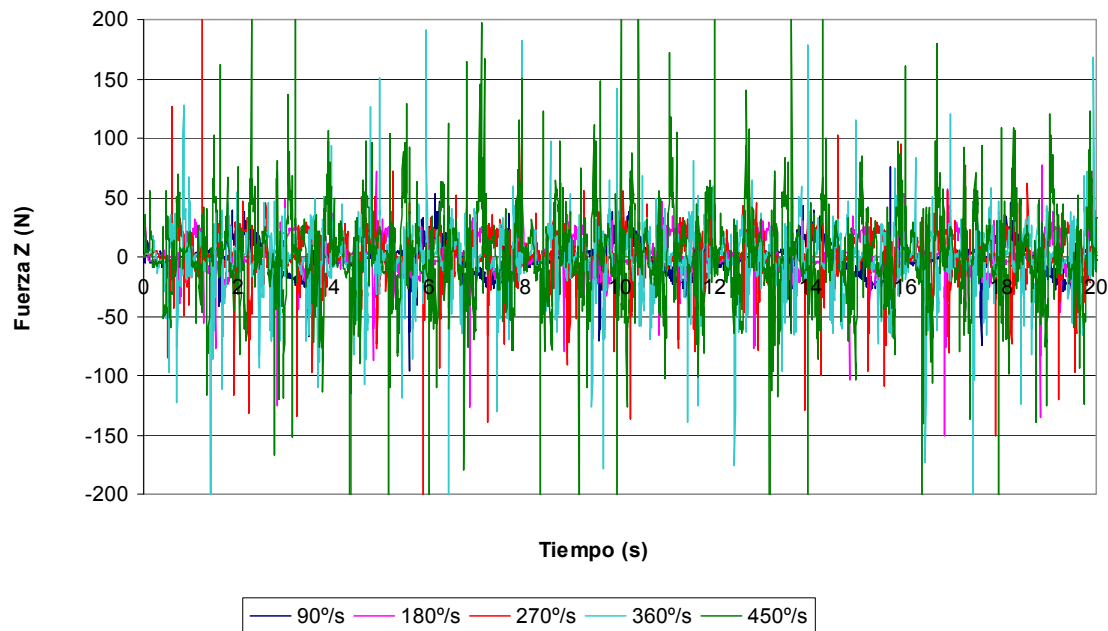


Figura 5.4.22 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

En el eje Z ocurre algo parecido que en el eje X. Debido al diseño del robot, a la unión entre elementos que da la estabilidad y permite el movimiento de caminar, el marker que estamos estudiando sufre una reacción en dirección vertical (eje Z), y con sentido positivo. Esto se debe a que la tibia al girar alrededor del pie tiende, en primer intervalo del paso, a moverse hacia delante y hacia abajo. Pero este movimiento llegará un momento que se verá impedido debido a la unión entre elementos que estabilizan el paso del robot. Este impedimento al movimiento se traduce en una fuerza vertical de sentido positivo sufrida por el marker 66.

En una segunda parte del movimiento de cada paso, se da una fuerza de sentido contrario a la anterior. Esto se debe a que en esta parte la rodilla gira en sentido contrario, es decir en sentido negativo alrededor del eje Y. Con lo que ahora el sistema estabilizador impide al movimiento ir más allá produciéndose esta reacción de sentido negativo.

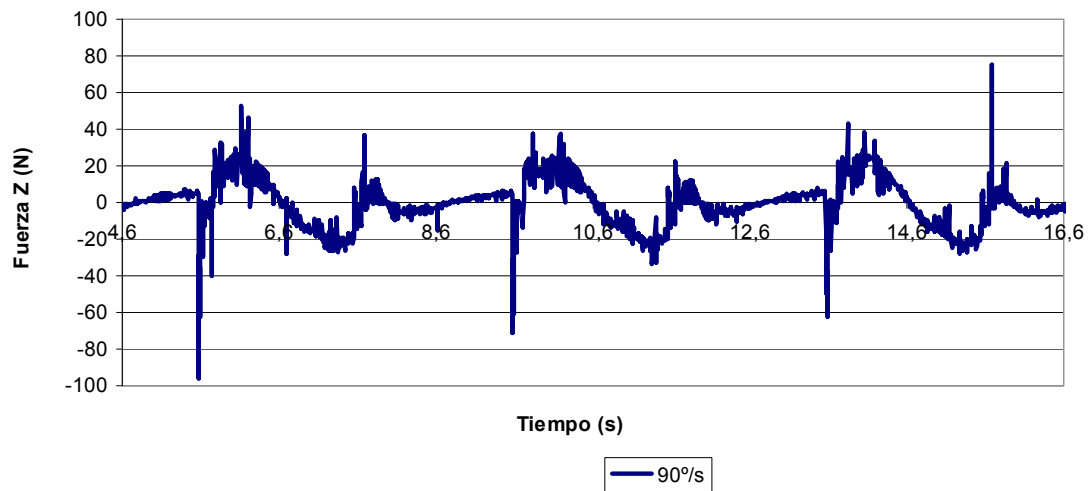


Figura 5.4.23 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

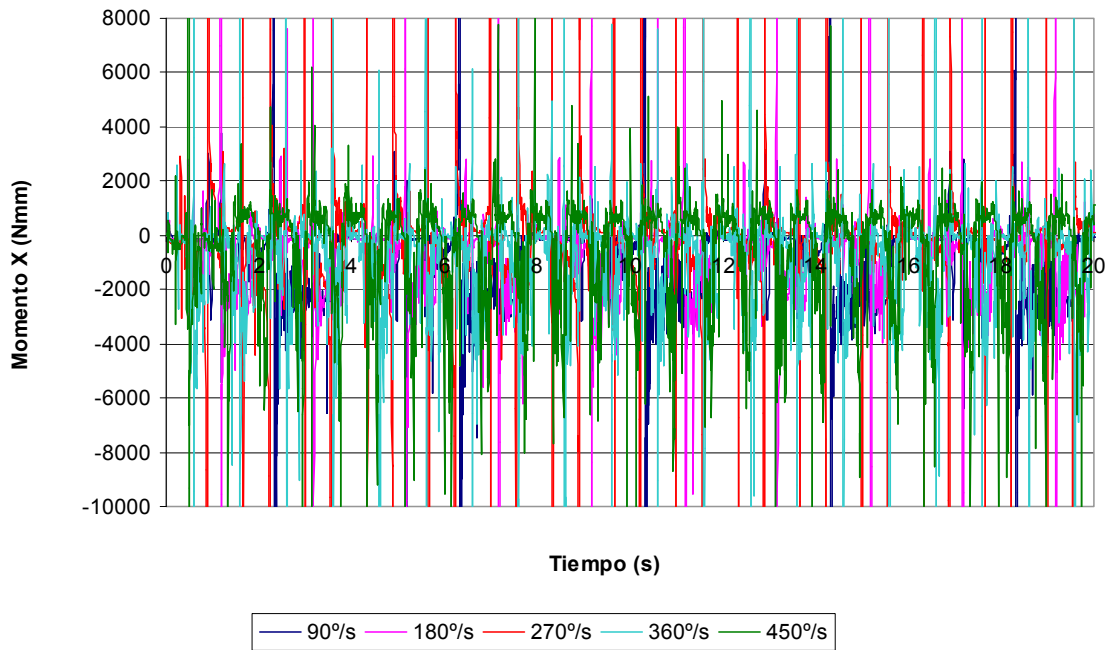
Parámetro: Momento**• Eje X:**

Figura 5.4.24 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 66

Vemos cara curva por separado.

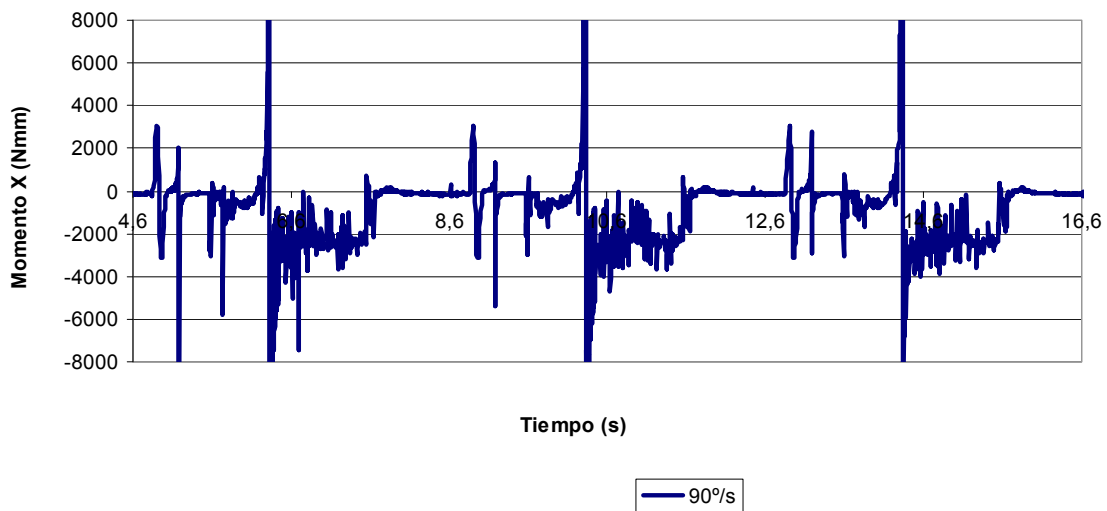


Figura 5.4.25 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

En las curvas podemos ver, a pesar de los picos producidos por el programa, como los valores que toma el momento en el eje X son de valor negativo, lo cual es

perfectamente lógico ya que será en este sentido sobre el que se incline el robot cuando la pierna izquierda esté en el aire y la derecha apoyada.

- Eje Y:

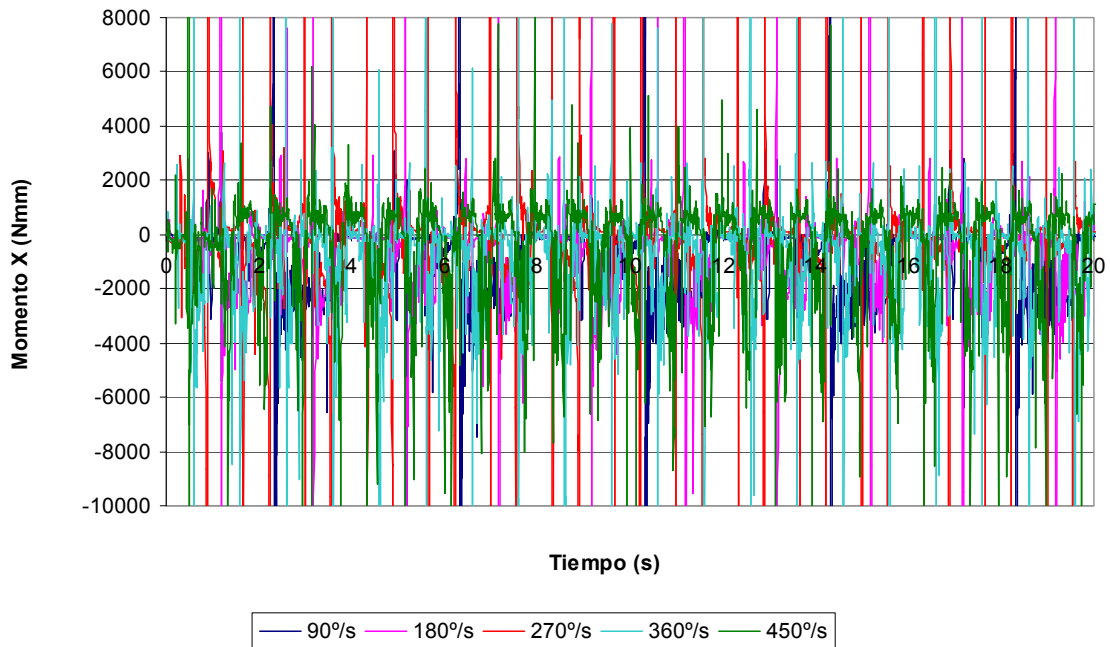


Figura 5.4.26 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 66

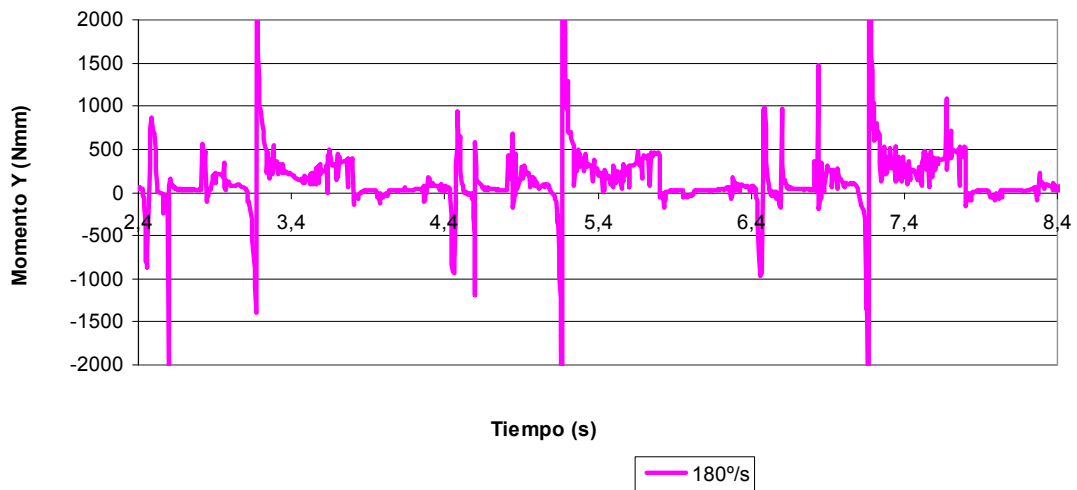


Figura 5.4.27 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

En el eje Y el valor absoluto del momento será de menor valor que el del eje X. Esto es gracias a los elementos de estabilización, ya que debido a ellos el robot soportará un menor esfuerzo entorno al eje Y.

- **Eje Z:**

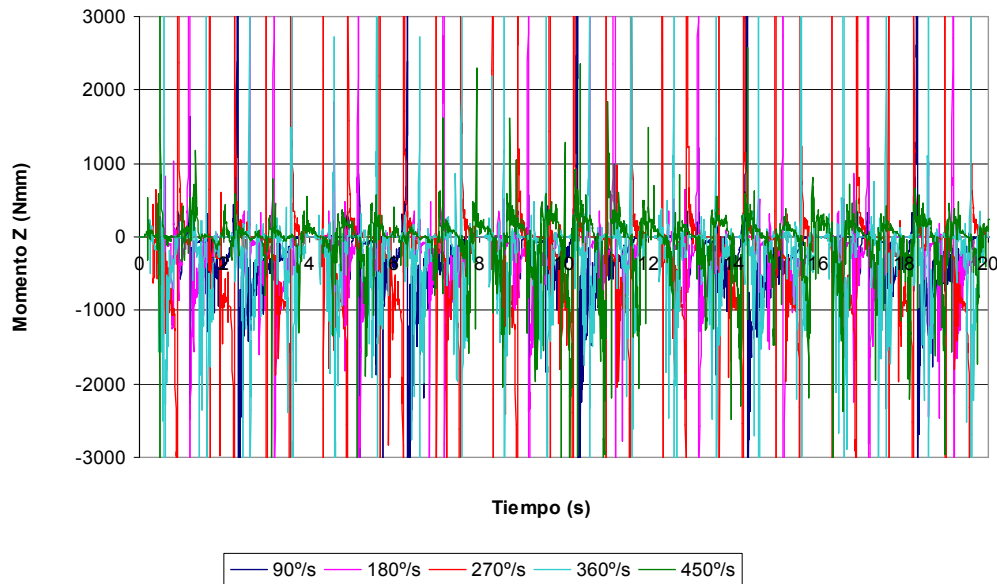


Figura 5.4.28 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 66

El momento en el eje Z se debe a la torsión a la que se ve sometida la pierna cuando el otro pie está realizando el paso haciendo que el robot pivote ligeramente sobre el pie de apoyo. También serán menores en general los valores para el eje Z que para el X, con lo que vemos que para este parámetro el eje más crítico será el X.

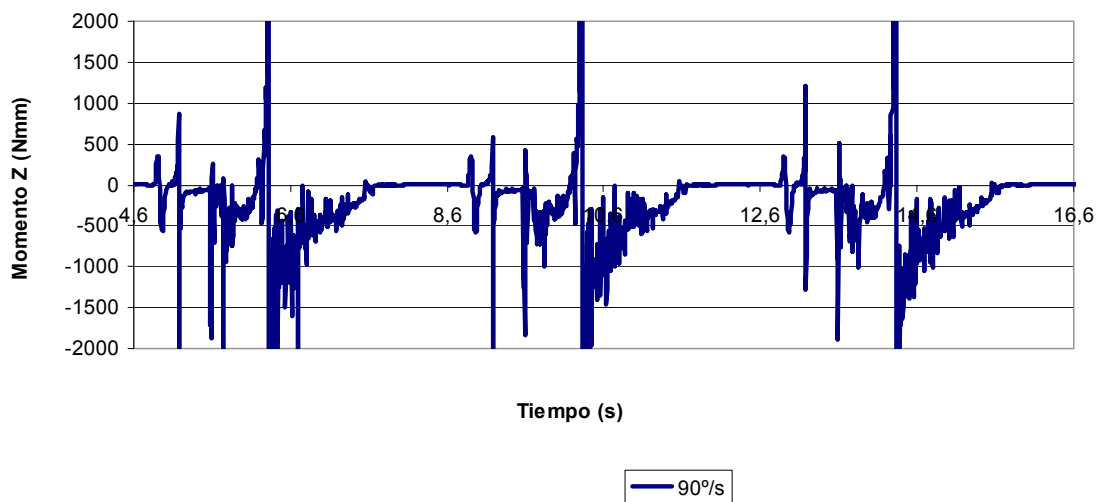


Figura 5.4.29 Momento en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 66

5.5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL MARKER 89

Como ya hemos comentado este marker se encuentra situado en la manivela derecha en su punto de contacto con la cadera. Primero vamos a ver como evoluciona la posición de este punto en el tiempo, en función de la velocidad de giro del motor.

Parámetro: Posición

▪ Eje X:

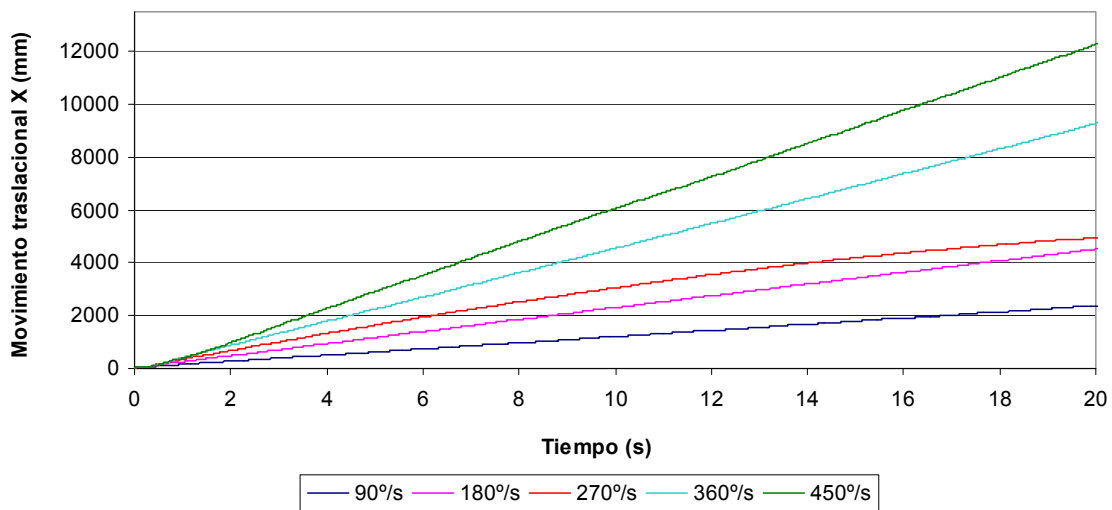


Figura 5.5.1. Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

Como se aprecia en el gráfico la distancia que recorre el robot en la dirección X (dirección en la que camina el robot como ya hemos explicado en el punto 4.2.1), y como es de esperar, es mayor a medida que va aumentando la velocidad de giro del motor al tener el mismo tiempo de simulación.

La distancia que recorre para cada velocidad es:

- A 90°/s el robot recorre 2366,28 mm en dirección X.
- A 180°/s el robot recorre 4515,03 mm en dirección X.
- A 270°/s el robot recorre 4954,23 mm en dirección X.
- A 360°/s el robot recorre 9285,31 mm en dirección X.
- A 450°/s el robot recorre 12285,96 mm en dirección X.

▪ Eje Y:

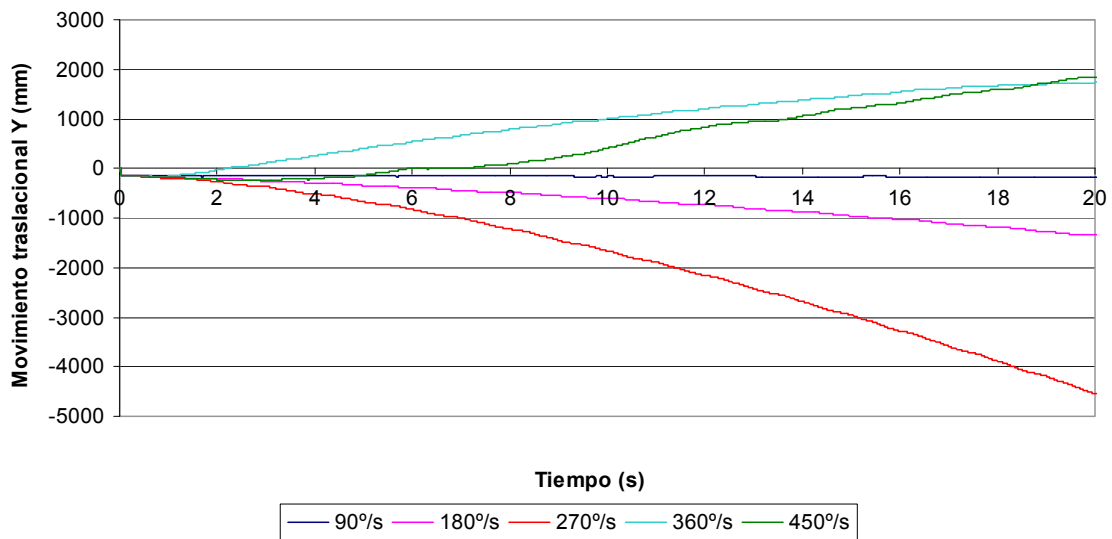


Figura 5.5.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

Como se observa en la gráfica el robot no camina recto salvo en su primera velocidad. El robot dependiendo de la velocidad que se le da, se desvía hacia la izquierda o hacia la derecha. Para las velocidades de 180 y 270 °/s el robot va desviándose poco a poco hacia la derecha, mientras que para 360 y 450 °/s el robot se desvía hacia la izquierda. La posición final del Marker 89 con respecto a su posición inicial en el eje Y para cada velocidad es:

- A 90°/s el robot se desvía 12 mm hacia la derecha.
- A 180°/s el robot se desvía 1198,4 mm hacia la derecha.
- A 270°/s el robot se desvía 4394,14 mm hacia la derecha.
- A 360°/s el robot se desvía 1887,53 mm hacia la izquierda.
- A 450°/s el robot se desvía 2001,4 hacia la izquierda.

Vemos que 270 °/s de velocidad de giro de motor es la velocidad para la cual el robot sufre un mayor desvío, y acaba situado a algo más de cuatro metros a la derecha de su posición inicial, en el eje Y tendría un valor de -4547,14 mm.

Es importante señalar el hecho de que el robot apenas sufre balanceos al caminar, ya que como se observa la evolución de esa desviación es más o menos lineal, con lo que el robot apenas se balancea hacia los lados, lo que le hace bastante estable.

▪ **Eje Z:**

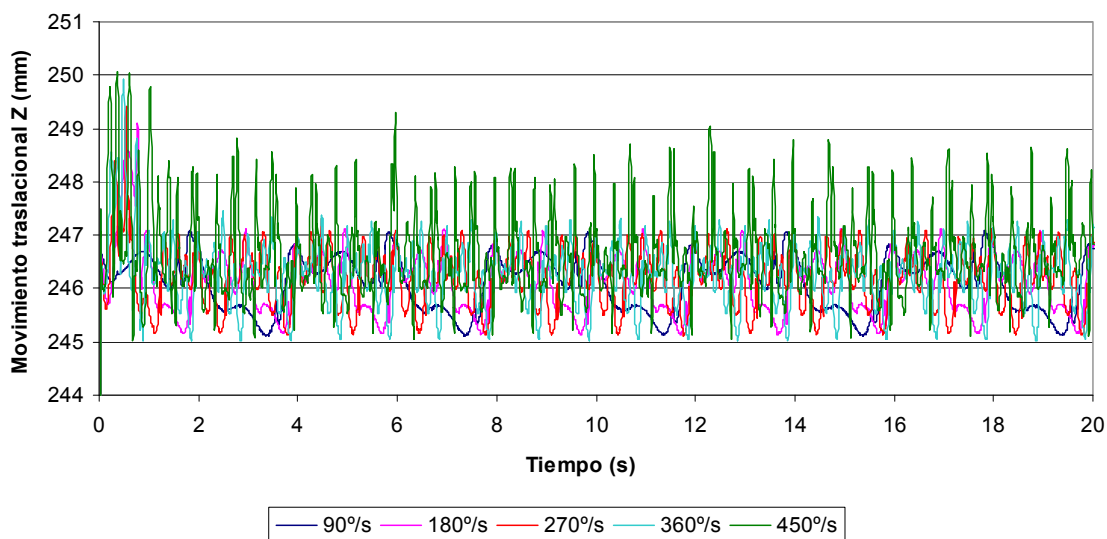


Figura 5.5.3 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89

La posición del Marker en el eje Z para cada instante de tiempo en función de las velocidades elegidas no nos aporta demasiada información, ya que como se puede observar la posición en el eje Z (dirección vertical) apenas varía. A 450 °/s el robot será algo más inestable haciendo que este punto alcance una posición algo superior a la del resto, pero es de apenas 3 mm de diferencia.

Para ver la evolución de los ciclos para cada velocidad colocamos cinco gráficas, una para cada velocidad y ajustamos la escala de los valores horizontales (el rango de tiempo que tarda en realizar tres pasos con la pierna derecha), el resto de gráficas puede verse en el Anexo 3 apartado 4.

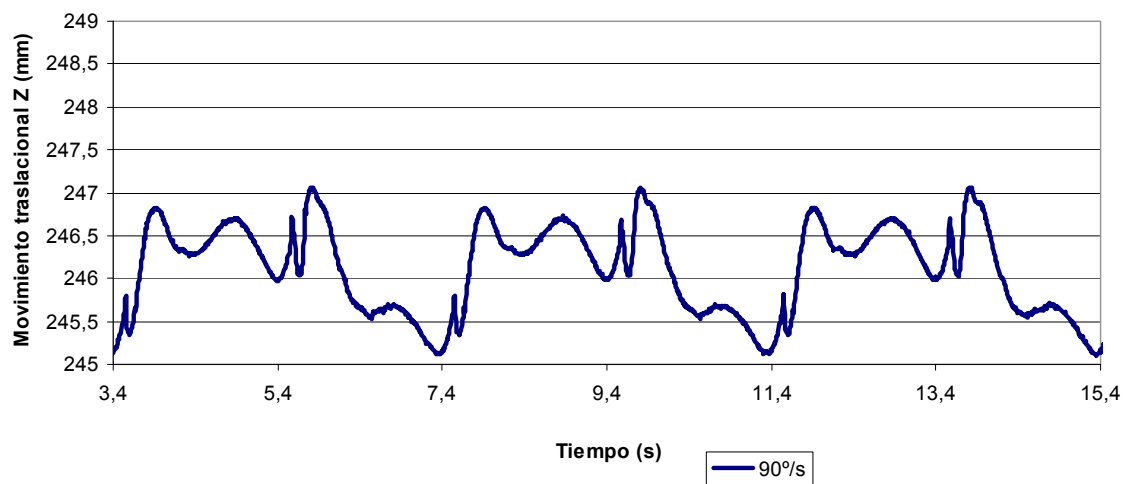


Figura 5.5.4 Movimiento traslacional en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89

Como se puede apreciar en las gráficas existe una forma muy similar en el movimiento que se produce en la dirección Z para todas las velocidades. Pero a medida que la velocidad de giro del motor va aumentando, también lo hacen las diferencias entre las curvas.

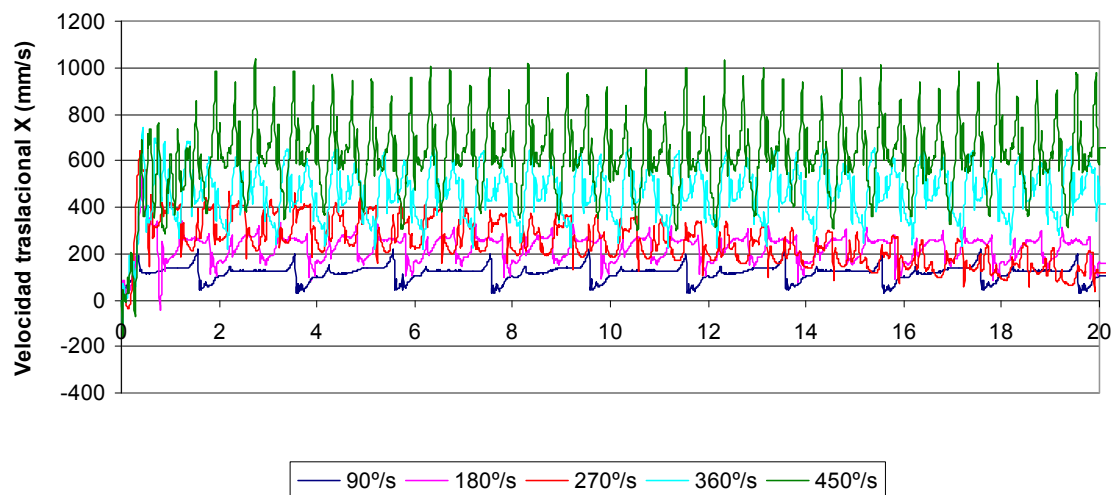
Parámetro: Velocidad traslacional▪ **Eje X:**

Figura 5.5.5 Velocidad traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

En el gráfico podemos ver como la velocidad en la dirección X, que es la del movimiento, varía bastante dependiendo de la velocidad de giro del motor. Para cada una de las distintas velocidades de giro del motor, la velocidad traslacional evoluciona cíclicamente con el tiempo. En el anexo puede verse mejor con las gráficas por separado, y aunque en algunas de las gráficas los ciclos estén más apretados (debido a que el robot da más pasos en el mismo tiempo) al modificar la escala se puede ver como en todas, la velocidad evoluciona cíclicamente.

En la siguiente gráfica vemos los valores máximos y mínimos de la velocidad traslacional en la dirección X en función de cada velocidad de giro del motor. Tomando valores medios de la velocidad traslacional máxima y mínima una vez que el proceso de caminar es más o menos estable (es decir, evoluciona cíclicamente con claridad), elaboramos esta gráfica en la que podemos ver la variación de la velocidad traslacional en el eje X en función de la velocidad de giro del motor.

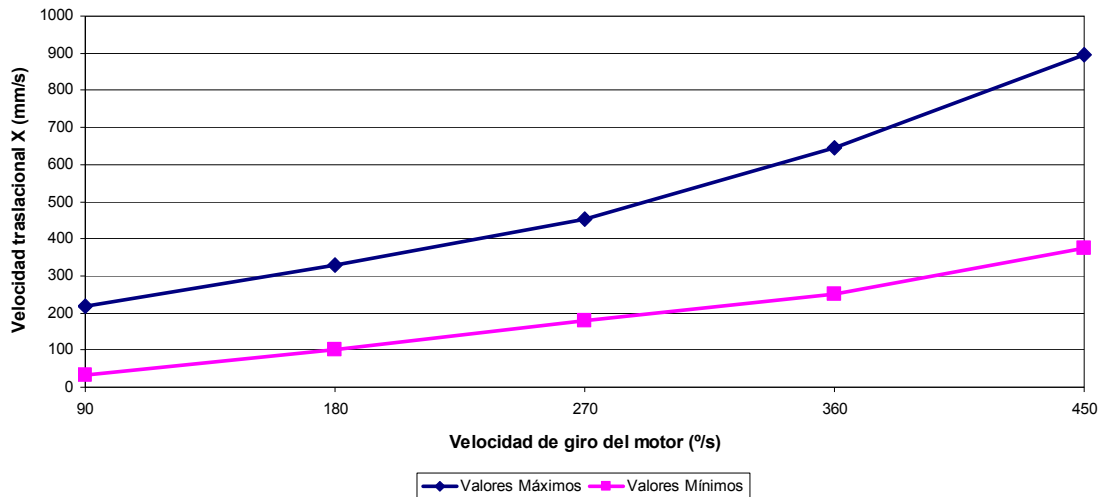


Figura 5.5.6 Velocidades traslacionales máx. y mín. X para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

▪ Eje Y:

La velocidad traslacional en función de la velocidad de giro del motor será un parámetro complicado de evaluar comparándolo entre las simulaciones realizadas. Esto se debe al hecho de la desviación que sufre el robot hacia un lado o hacia otro en la simulación.

▪ Eje Z:

Como ya he comentado anteriormente la posición del Marker 89 al estar fijo en la unión entre la manivela derecha y la cadera apenas se mueve en dirección Z. Esto supone que la velocidad traslacional en este eje sufra variaciones muy pequeñas.

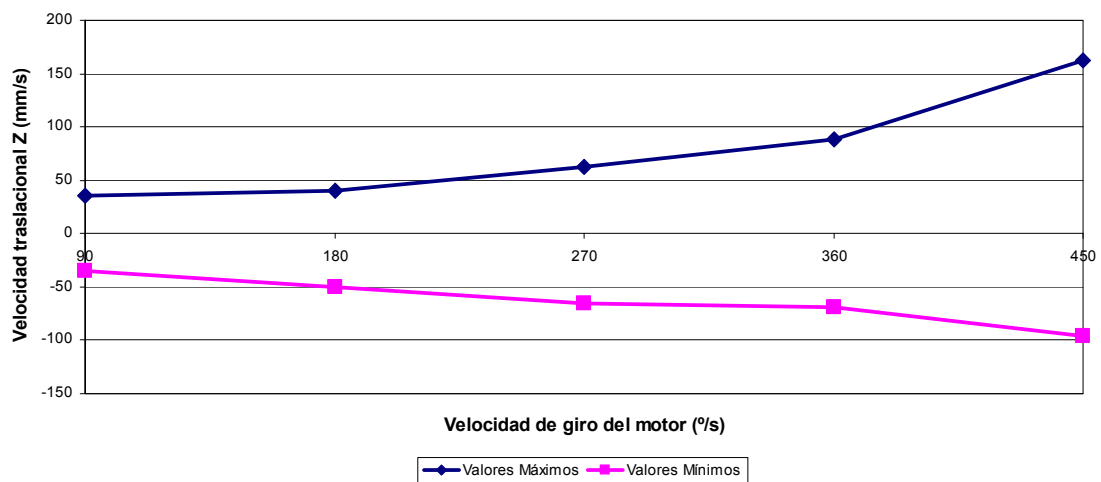


Figura 5.5.7 Velocidades traslacionales máx. y mín. en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

Como vemos en el gráfico la velocidad con la que sube y baja este punto del robot va aumentando a medida que aumenta la velocidad de giro del motor. Esto hace que el proceso de caminar se va haciendo más inestable conforme vamos aumentando la velocidad de giro del motor.

Parámetro: Velocidad angular**▪ Eje X:**

La velocidad angular del Marker 89 en la dirección X en teoría debería ser prácticamente nula, lo que significaría que el robot apenas pivotaría sobre su pierna de apoyo, efecto que produce que se desvíe hacia la izquierda o la derecha al caminar. Sin embargo esto no es así, tampoco en el programa de simulación, con lo que el robot se desvía hacia los lados. Se desvía cuando la pierna de apoyo gira ligeramente lo que hace que el robot poco a poco se vaya desviando hacia uno de los lados.

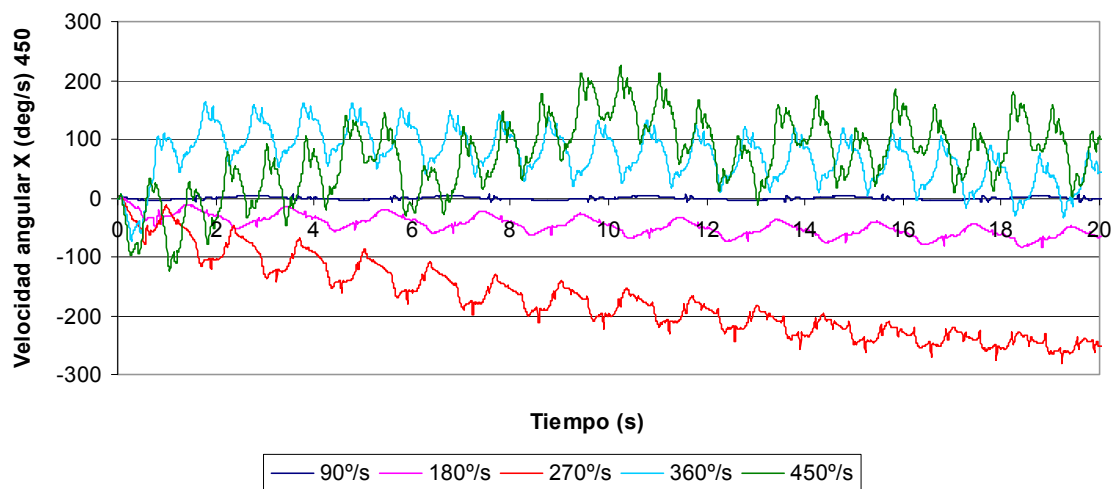


Figura 5.5.8 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

Se puede apreciar como para la primera velocidad de giro del motor (90 °/s), la velocidad angular del Marker 89 en el eje X es prácticamente nula, con valores máximos que rondan los 5 grados por segundo. Sin embargo a medida que vamos aumentando la velocidad de giro del motor el robot se va haciendo poco a poco más inestable con lo que caminará cada vez menos en línea recta debido a un ligero pivotamiento que se produce en la pierna de apoyo a la hora de realizar un paso.

Según el programa de simulación este pivotamiento, dependiendo de la velocidad, lo hará con una pierna o con otra. Con lo que se desviará hacia la izquierda o hacia la derecha dependiendo de la pierna que pivote.

- **Eje Y:**

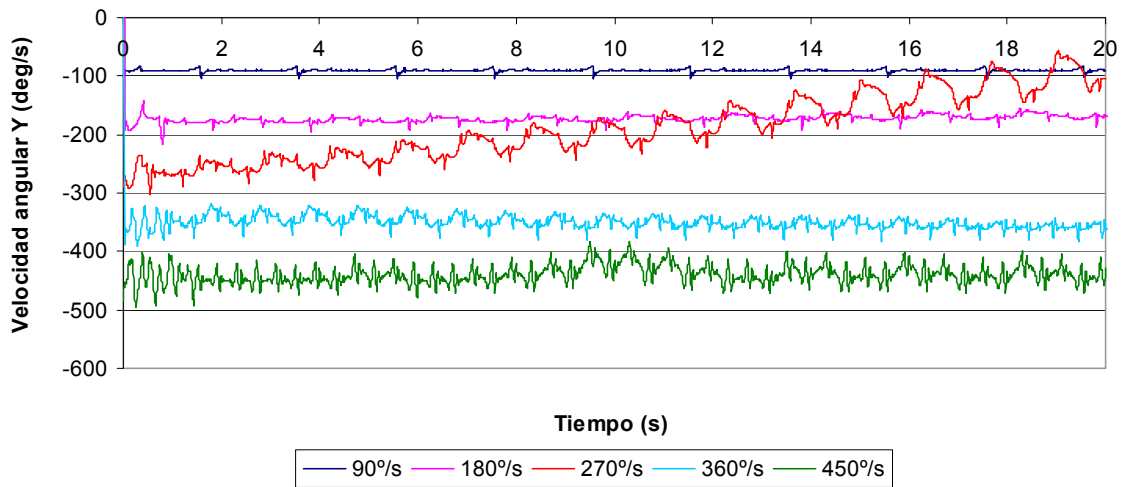


Figura 5.5.9 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

Para este parámetro en torno al eje Y vemos como está girando debido al movimiento que le produce el motor (en el caso de la simulación este movimiento viene dado por el actuador). La velocidad de giro será más o menos estable en todas las velocidades de giro del motor. Sin embargo podemos observar como para alguna de las velocidades de giro de motor, como por ejemplo para 270 °/s, a pesar de mantener un comportamiento cíclico y prácticamente lineal, va disminuyendo en valor absoluto poco a poco.

Esto es debido a que para esta velocidad el robot se desvía más que en los demás casos, lo que supone que esa velocidad se vea poco a poco dividida al ir girando y repartiéndose con el otro eje cartesiano hacia el que va girando.

- **Eje Z:**

Con el parámetro de la velocidad angular del Marker 89 en dirección Z podemos ver la velocidad con la que el robot pivota sobre un pie al caminar como ya hemos comentado anteriormente.

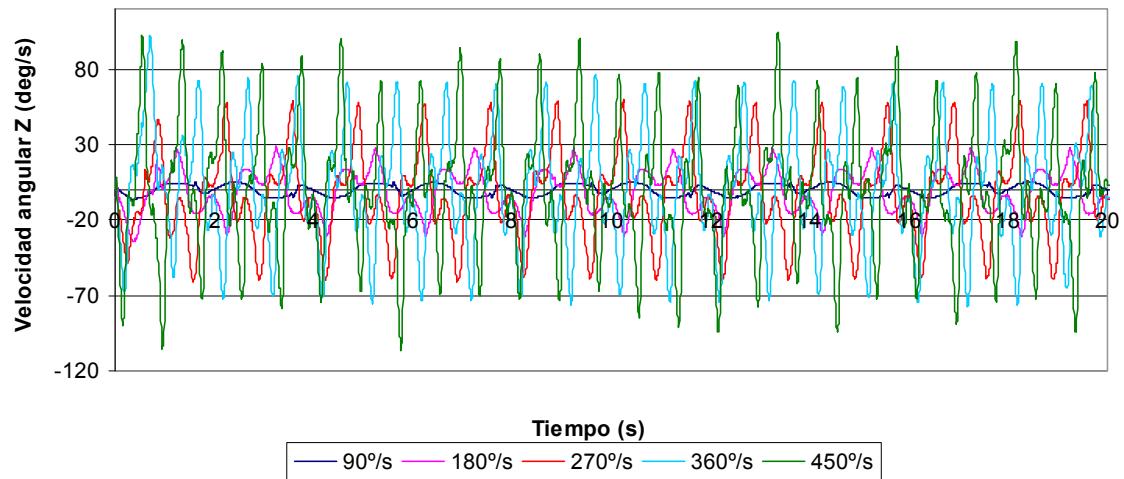


Figura 5.5.10 Velocidad angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker

Parámetro: Aceleración traslacional**▪ Eje X**

Como para el resto de parámetros hemos comparado en una misma gráfica el valor que toma para cada instante de tiempo y velocidad de giro del motor la aceleración traslacional en el eje X.

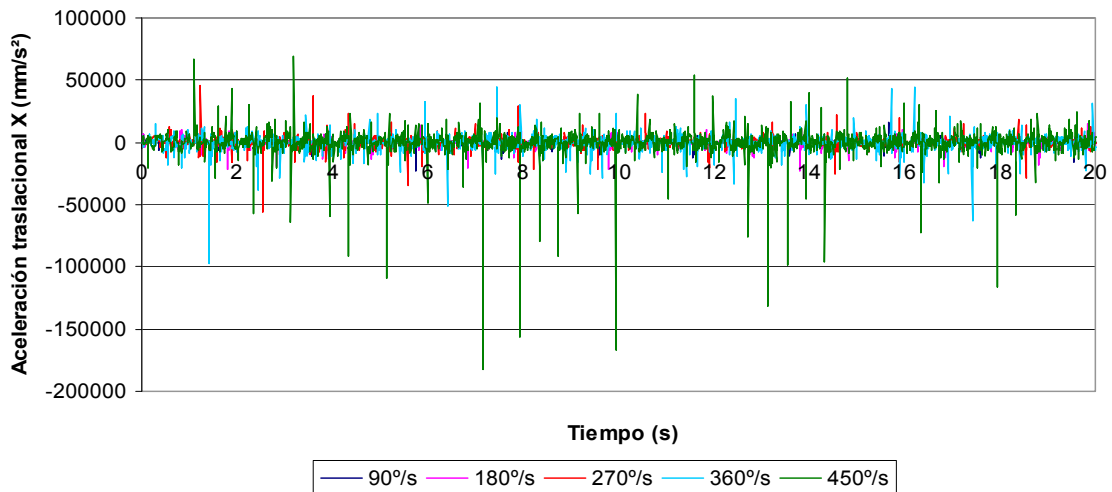


Figura 5.5.11 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

▪ Eje Y:

Para la aceleración traslacional en el eje Y hacemos lo mismo que para la dirección X.

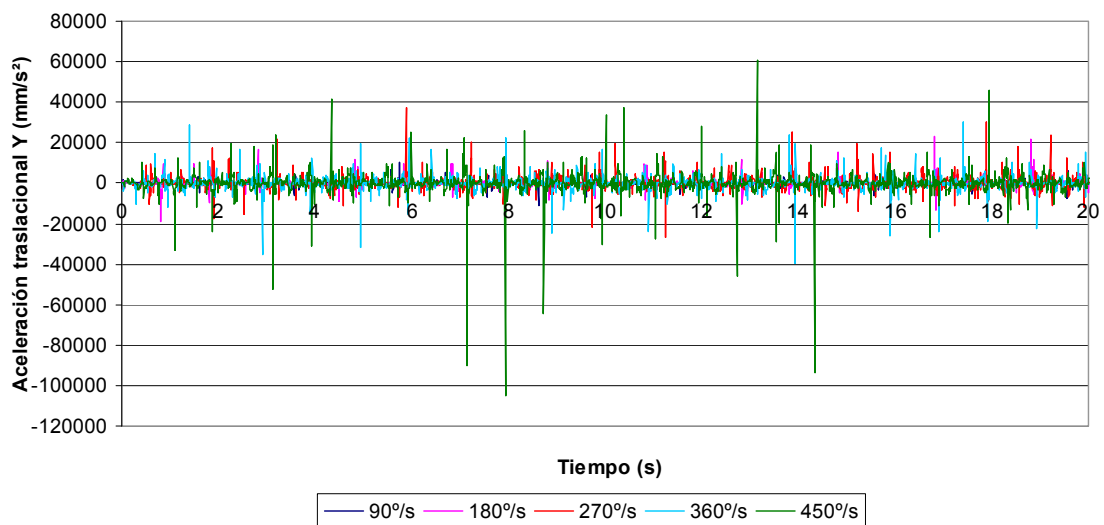


Figura 5.5.12 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

▪ Eje Z:

Hacemos lo mismo para la dirección Z que para las direcciones anteriores.

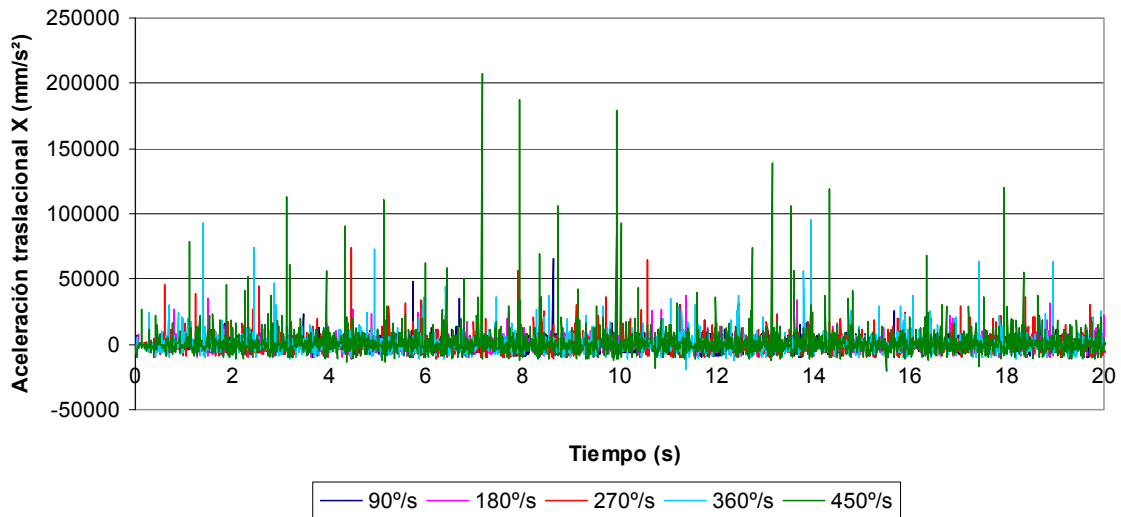


Figura 5.5.13 Aceleración traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89

Este parámetro nos indica la aceleración con la que el robot (caracterizado por este marker al estar situado en la cadera, que es un elemento fijo del robot), se mueve hacia arriba y hacia abajo al caminar. En este caso los datos obtenidos para las diferentes velocidades del motor difieren pero no tan como en otros parámetros o direcciones. A continuación podemos ver como evolucionan los valores máximos y mínimos representativos en función de la velocidad del motor.

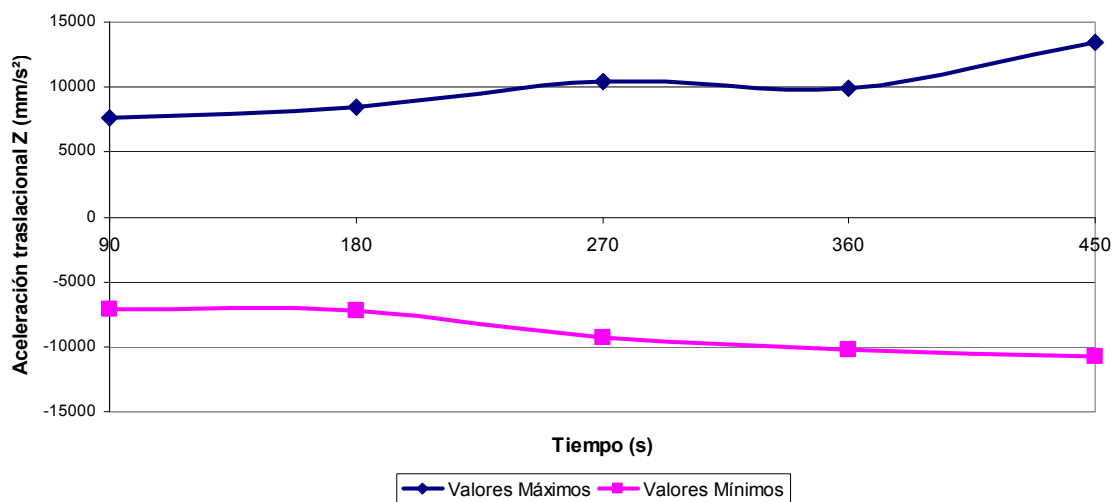


Figura 5.5.14 Valores máximos y mínimos de Aceleración traslacional en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

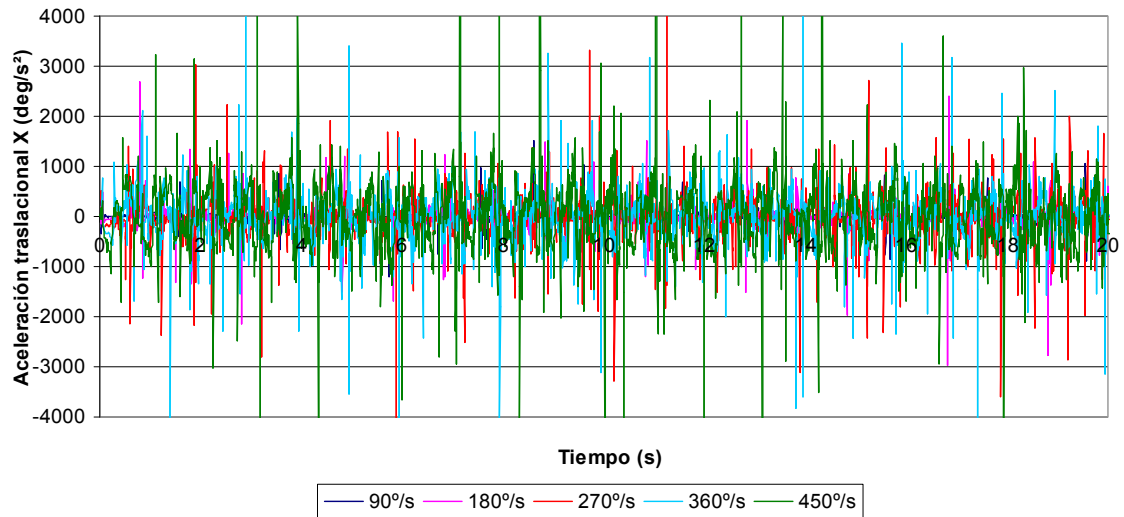
Parámetro: Aceleración angular**▪ Eje X:**

Figura 5.5.16 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

▪ Eje Y:

De nuevo para el eje Y en la gráfica completa se hace difícil apreciar la evolución de la aceleración angular, con lo que haremos lo mismo que antes.

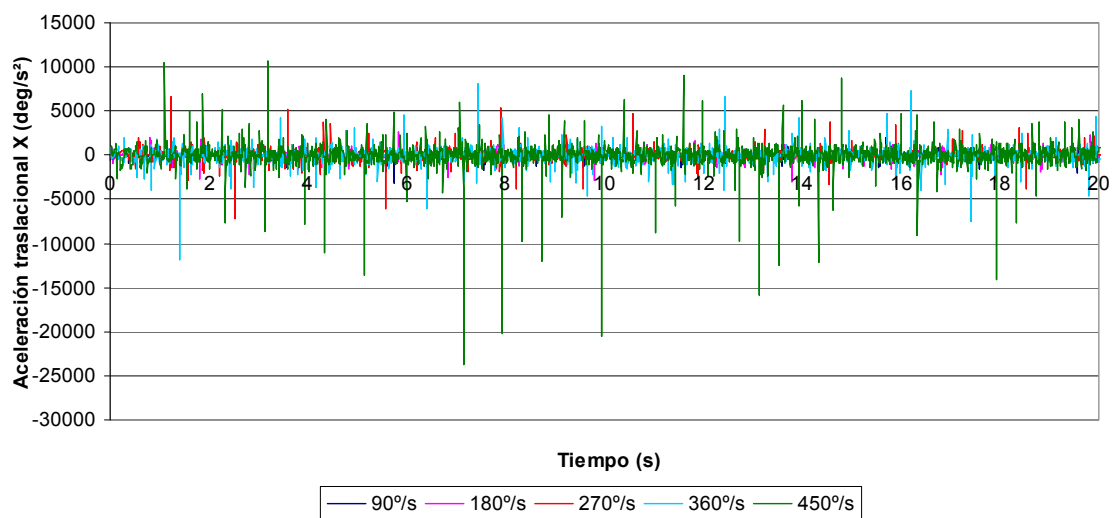


Figura 5.5.17 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

▪ Eje Z:

Para la aceleración angular del eje Z seguimos el mismo procedimiento que para las anteriores direcciones espaciales.

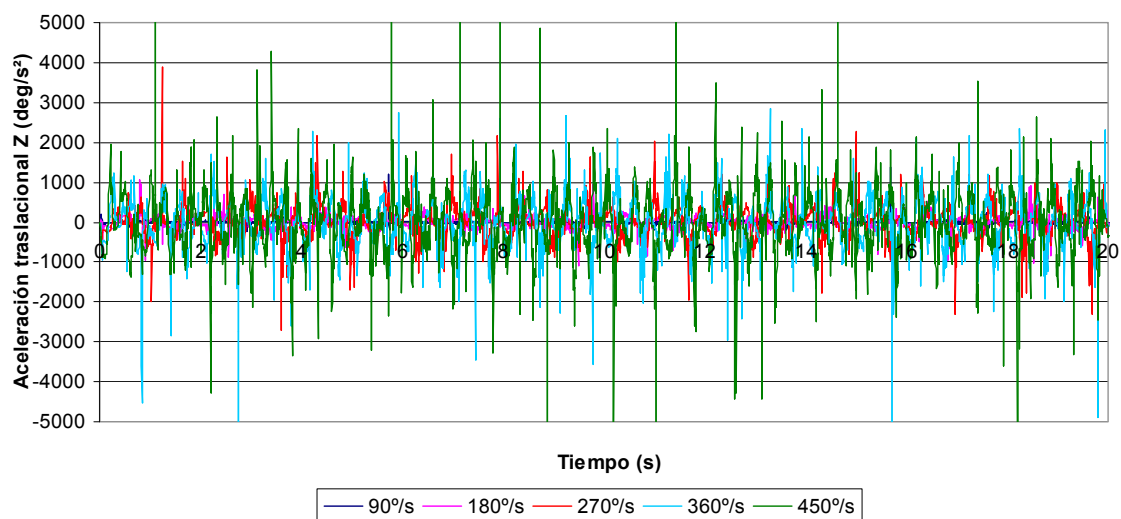


Figura 5.5.20 Aceleración angular para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89

Parámetro: Fuerza

A continuación veremos cuáles son las fuerzas que debe soportar este marker en los tres ejes espaciales.

▪ Eje X:

En el eje X vemos las fuerzas que el Marker 89 soporta en la dirección en la que se mueve el robot.

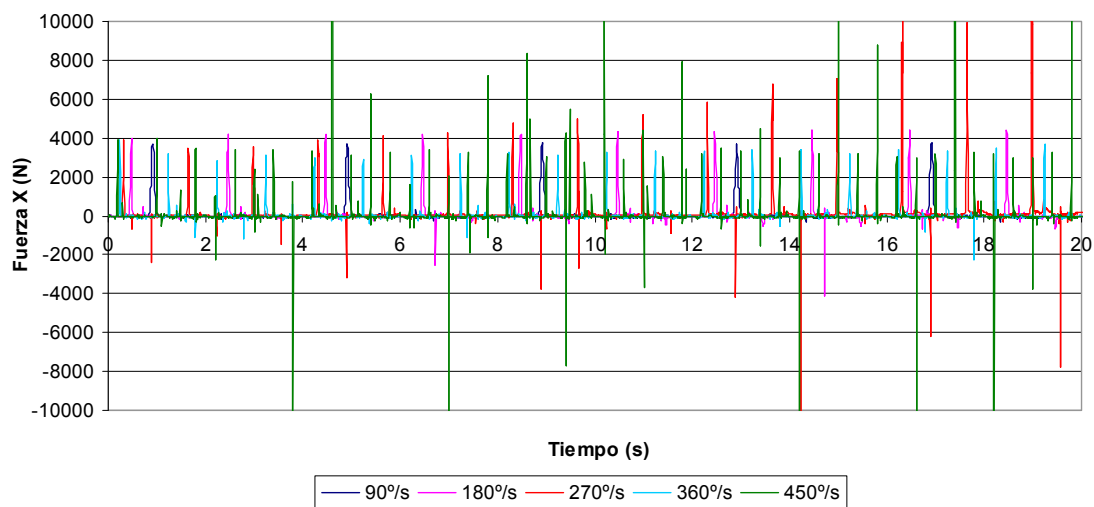


Figura 5.5.21 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

Para apreciar mejor los pequeños cambios que se dan en la fuerza que soporta en dirección X el marker, modificaremos las gráficas del mismo modo que en casos anteriores para ver tres pasos de la pierna derecha.

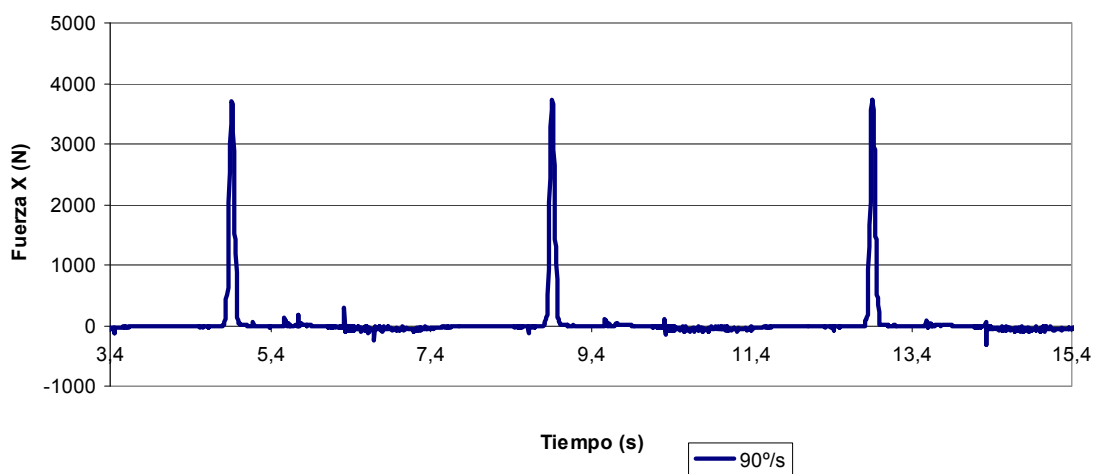


Figura 5.5.22 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89

Llegados a este punto vemos un fenómeno inesperado y que viene dado por algún problema con el programa de simulación. Aunque MSC. Adams es una herramienta de gran valor que nos permite simular y estudiar situaciones hipotéticas, también es un programa informático y de vez en cuando puede ocurrir que obtengamos resultados falsos que pueden ser debidos a errores en la implementación, o errores en la programación. En la figura 5.5.23, una vez filtramos los datos, vemos el comportamiento real del esfuerzo que sufre el marker en el eje X. A cada paso el marker sufre una fuerza en X en sentido negativo de aproximadamente 50 N.

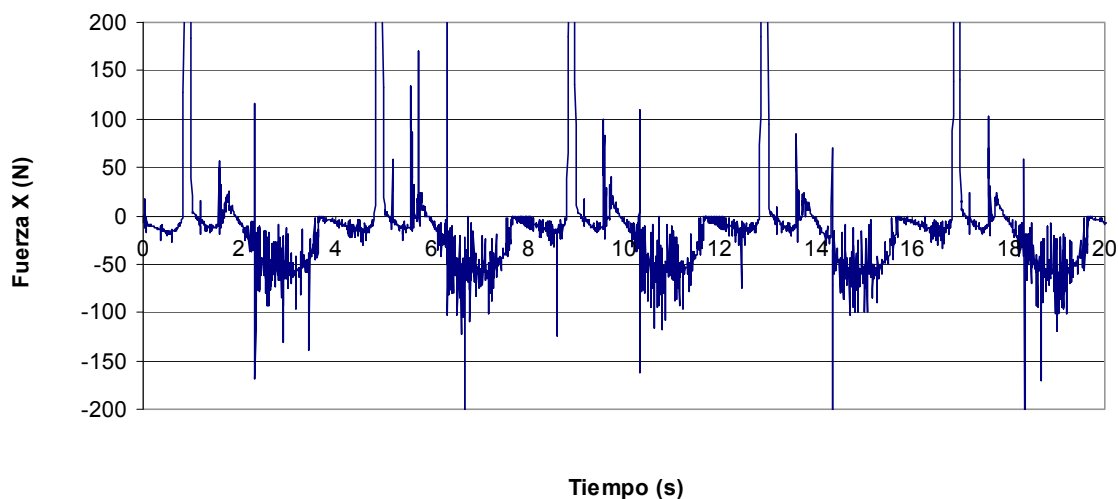


Figura 5.5.23 Fuerza en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados

En nuestro caso el error son los saltos o “picos” que podemos ver en las Figura 5.5.21 y más claramente en la Figura 5.5.22. En la gráfica vemos como para la fuerza que sufre en el marker 89 en dirección X se producen unos saltos de casi 4000 Newtons de diferencia con el resto de la curva, que serían los datos correctos. Estos picos los vamos a ver en cada una de las siguientes figuras.

Este fenómeno es un fallo que se sale de la curva lógica de esfuerzo que sufre el marker, y que supondría también un enorme pico de potencia a cada paso que da el robot. El causante de este error es el nuevo sistema de deslizadera en “T” que tenemos en este modelo de simulación del robot. En el modelo anterior a este, sólo existía la deslizadera horizontal, que estaba fija a la cadera y no tenía desplazamiento vertical. Con este modelo he comprobado que este fenómeno es inexistente, y aunque el paso del robot es mucho más inestable, también es cierto que en la simulación no obtenemos estos valores falsos.

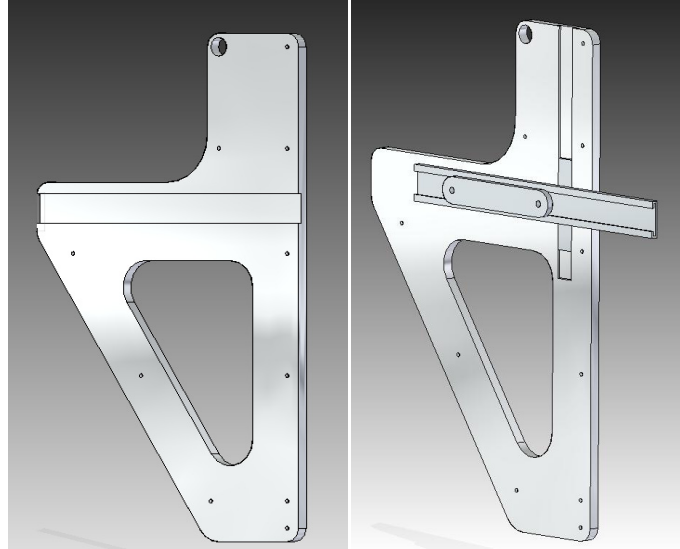


Figura 5.5.24 Pieza del elemento cadera con deslizadera simple y con deslizadera en T

Los valores de estos picos de esfuerzo van aumentando conforme aumentamos la velocidad de giro del motor, y lo mismo ocurre para la potencia consumida por el motor, donde empezaríamos con picos de potencia de 100 W a una velocidad de giro de 90 °/s, para acabar con picos de casi 500 W a 450 °/s.

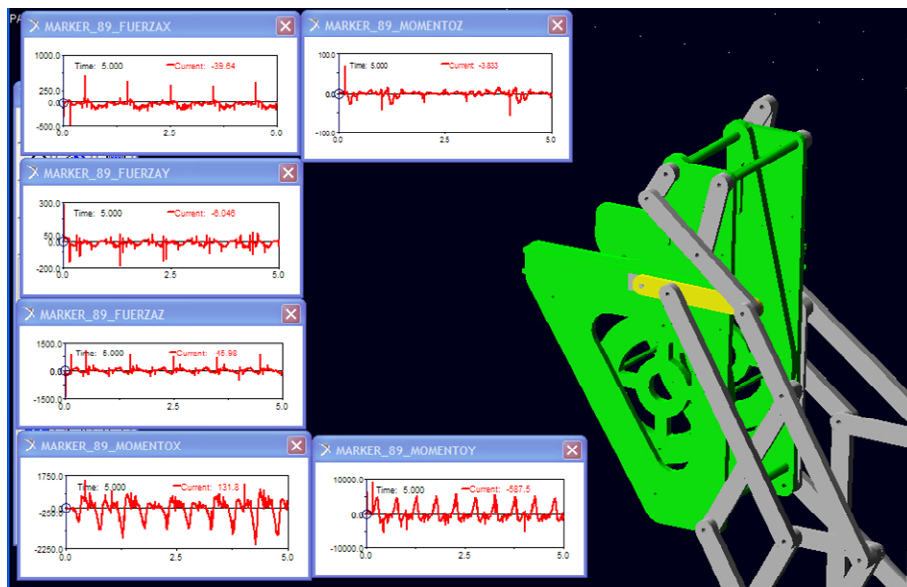


Figura 5.5.25 Esfuerzos en el robot Pasibot sin deslizadera T

Como podemos ver en la figura 5.5.24 cada una de las curvas tiene una forma lógica y sin picos fuera de los valores reales.

▪ Eje Y:

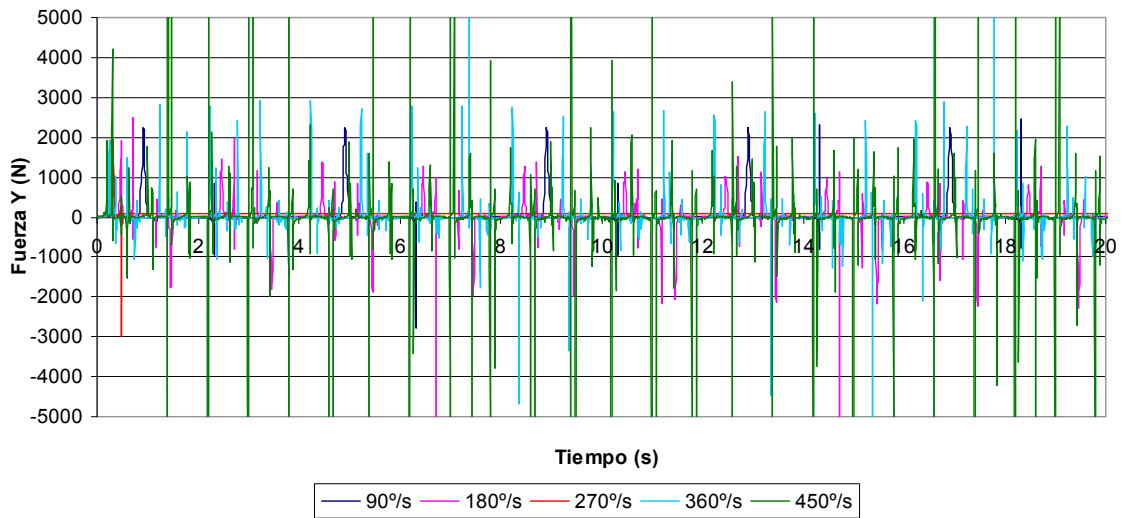


Figura 5.5.26 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

Para la dirección Y sucede lo mismo que para X, dependiendo de la velocidad cada cierto tiempo se produce un paso y en el instante en que la manivela está en posición horizontal apuntando hacia delante y girando en sentido contrario a las agujas del reloj se produce un esfuerzo sobre el marker en los tres ejes.

Para la dirección Y hacemos lo mismo que para X. En la dirección Y podremos ver las reacciones que sufre el marker para esta dirección.

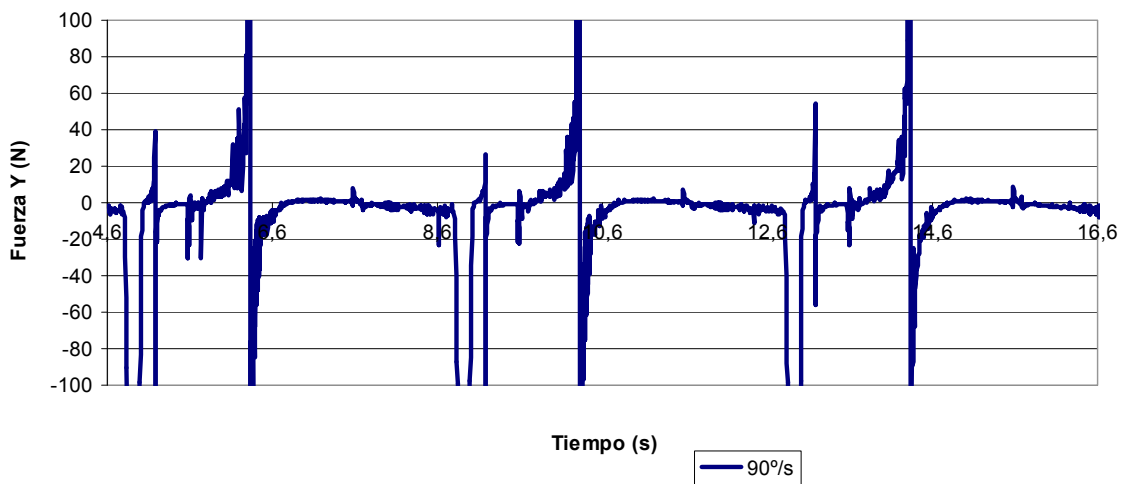


Figura 5.5.27 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89 con datos filtrados

▪ Eje Z:

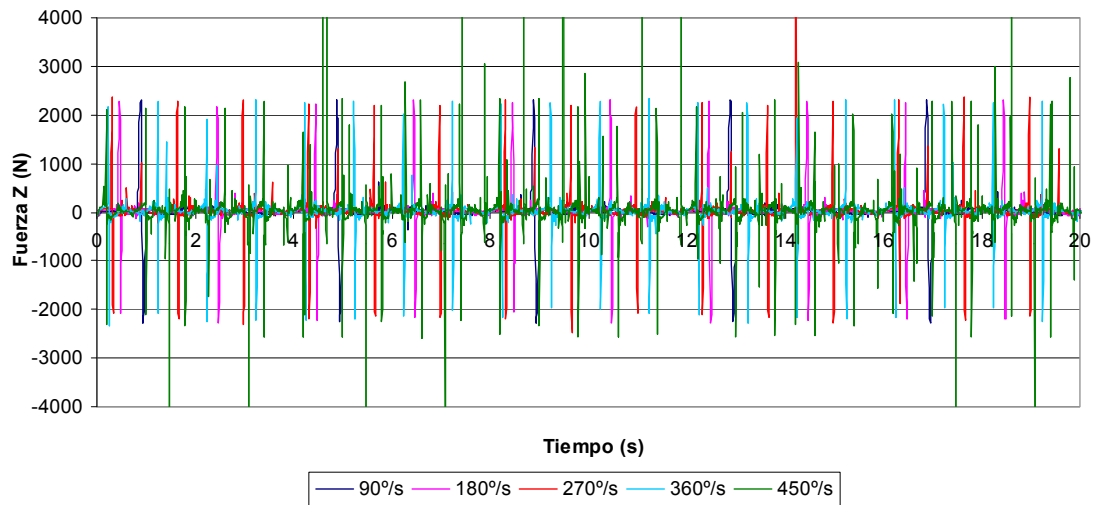


Figura 5.5.28 Fuerza para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89

Para la dirección Z veremos las fuerzas que sufre el marker lo que nos indica las reacciones verticales que soporta este punto para un periodo de tres ciclos, o lo que es lo mismo, tres pasos de la pierna derecha.

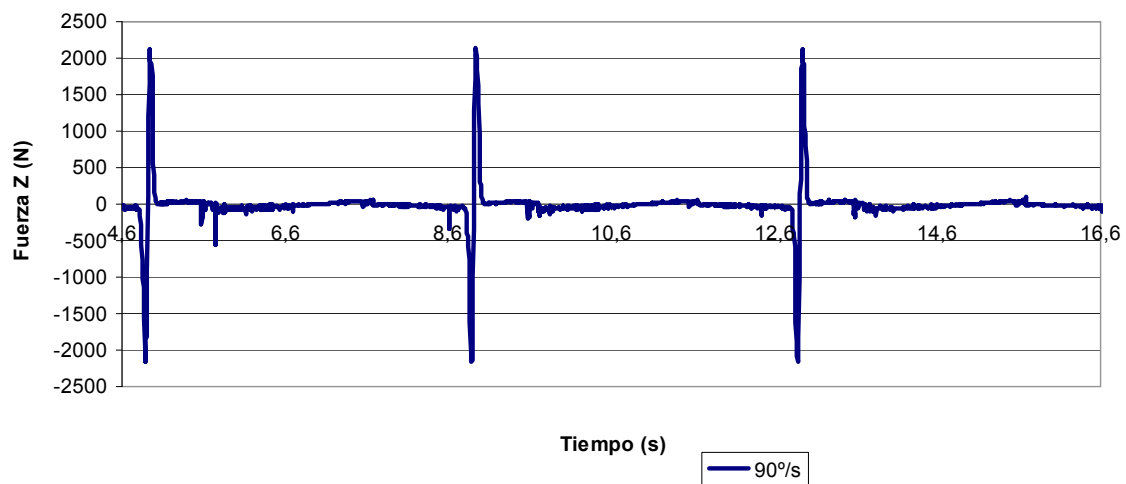


Figura 5.5.29 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89

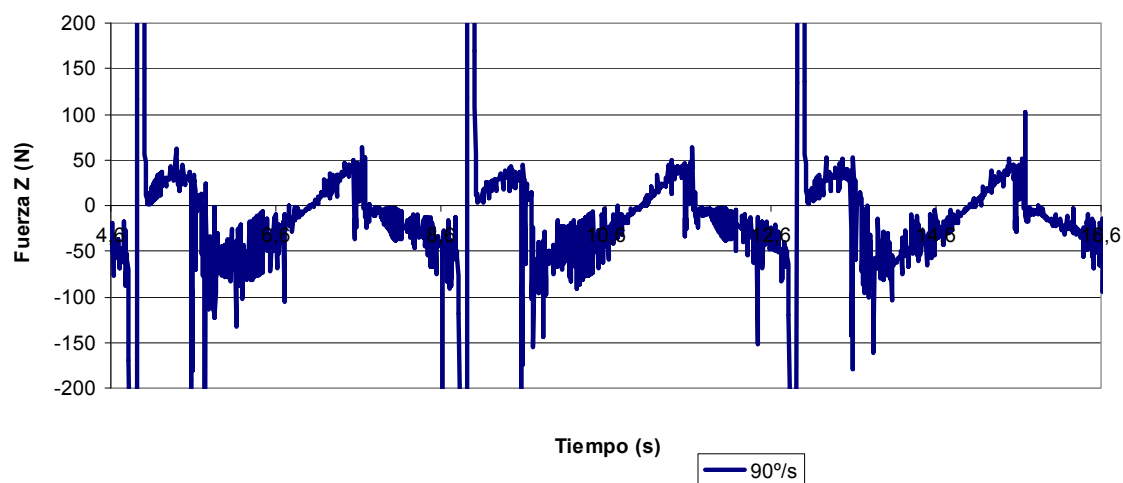


Figura 5.5.30 Fuerza en Z para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados

La figura 5.5.27 nos muestra la gráfica obtenida por el programa, a la que realizamos un filtrado para poder ver la que sería la curva lógica del esfuerzo en Z sin esos picos. Vemos como en la dirección vertical los esfuerzos se mantienen entre los 50 y -50 N.

Parámetro: Momento

A continuación vemos cuál es el momento o par que soporta el Marker 89 en cada uno de los ejes espaciales. Este es un parámetro con una particularidad en este marker debido al diseño que se hizo en el programa de simulación del robot Pasibot. Como ya comenté en el punto “3.3 Modelo simplificado” el movimiento del robot viene dado por un actuador, que es un motor rotativo, que hace girar a la manivela derecha a la velocidad que se le requiera.

Para dar movimiento a la pierna izquierda lo que se hizo fue unirla a la manivela derecha mediante una junta fija. Esto supone que el par o momento que soporta la manivela derecha para dar movimiento será no sólo la producida por la pierna derecha, si no que también soportará el momento producido por la pierna izquierda ya que la manivela derecha arrastra a la izquierda para darle movimiento. Esto supone que en las gráficas del par de este marker de la manivela habrá el doble de ciclos de esfuerzos y que estarán los de la derecha y los de la izquierda también.

▪ Eje X:

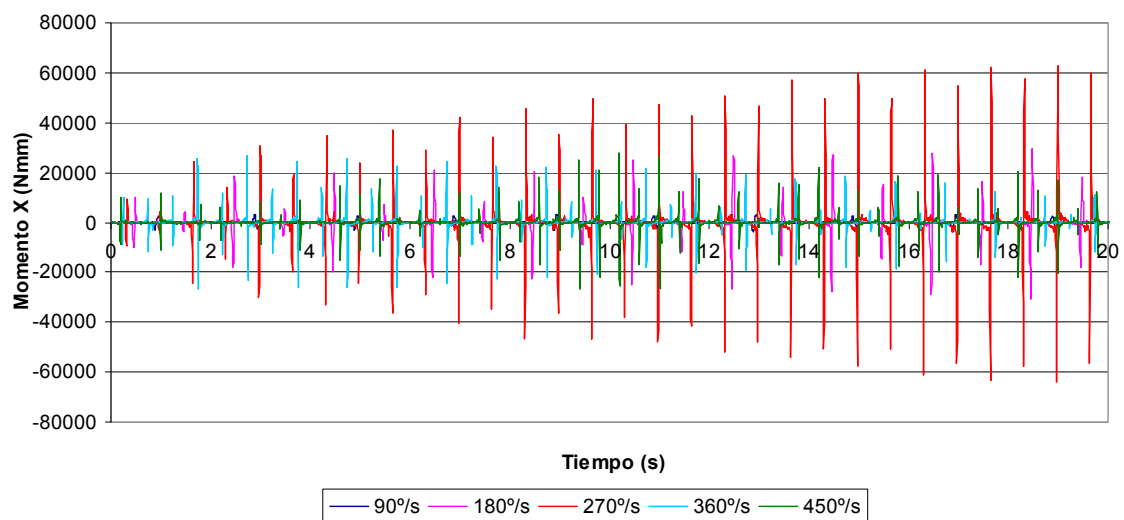


Figura 5.5.31 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

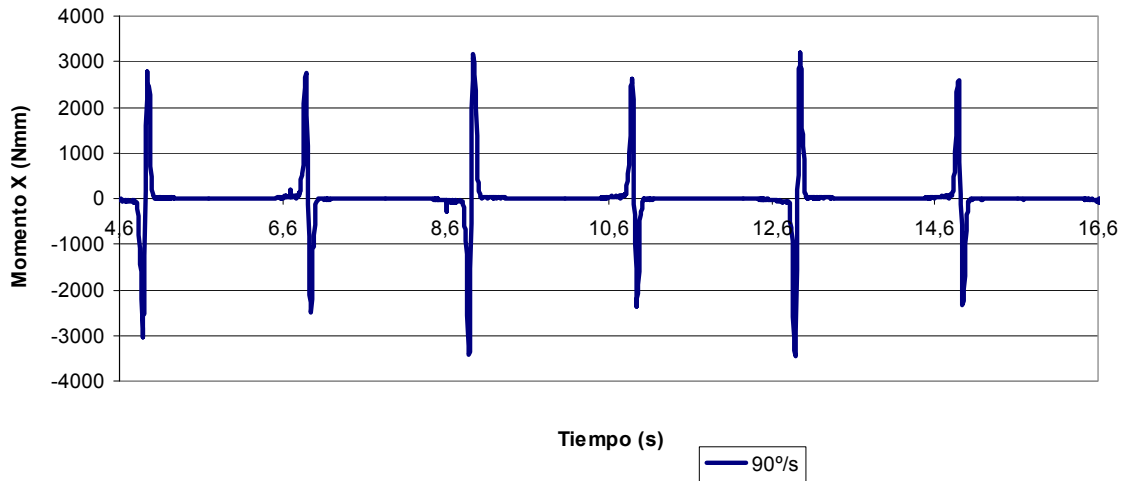


Figura 5.5.32 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89

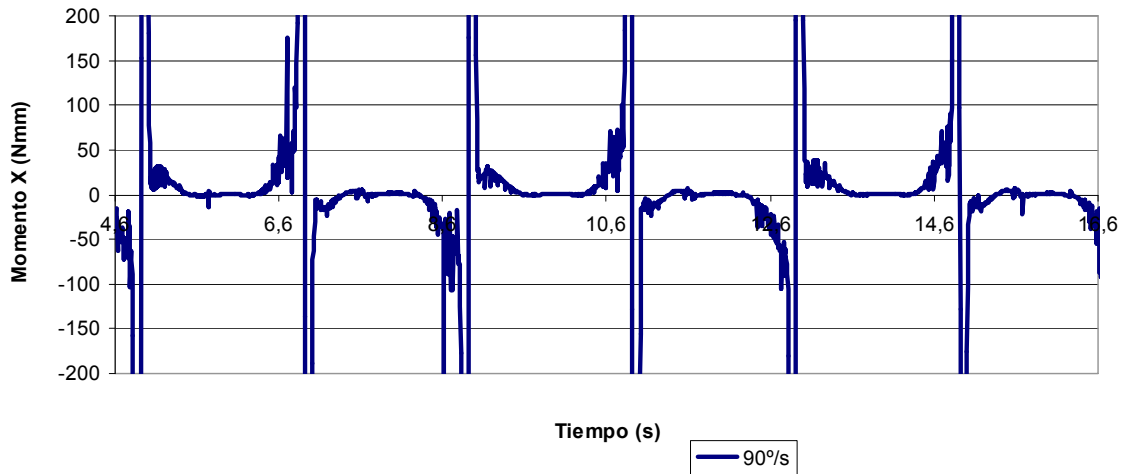


Figura 5.5.33 Momento en X para 90°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados

Lo primero que se observa en las figuras 5.5.31 es que como ya hemos dicho, para el par se produce el doble de ciclos en las gráficas que para otros parámetros. Antes para el tiempo de intervalo dado en la gráfica se obtenían 3 ciclos mientras que ahora obtenemos 6, los de la pierna derecha y los de la pierna izquierda.

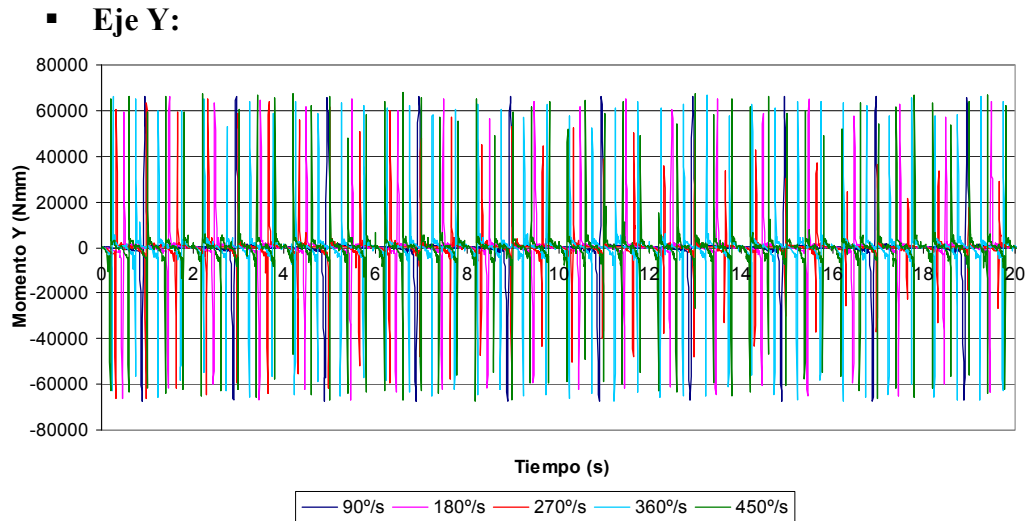


Figura 5.5.34 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

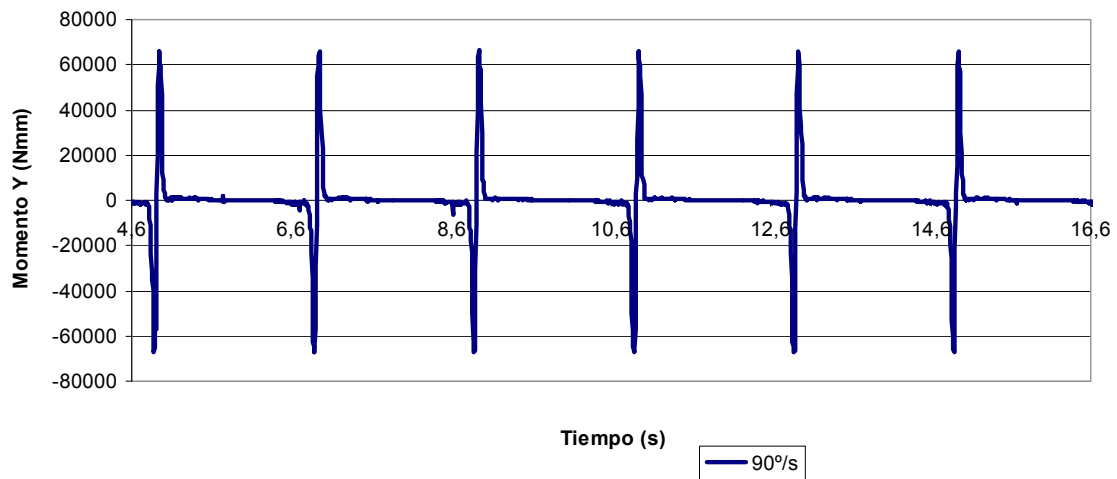


Figura 5.5.35 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 89

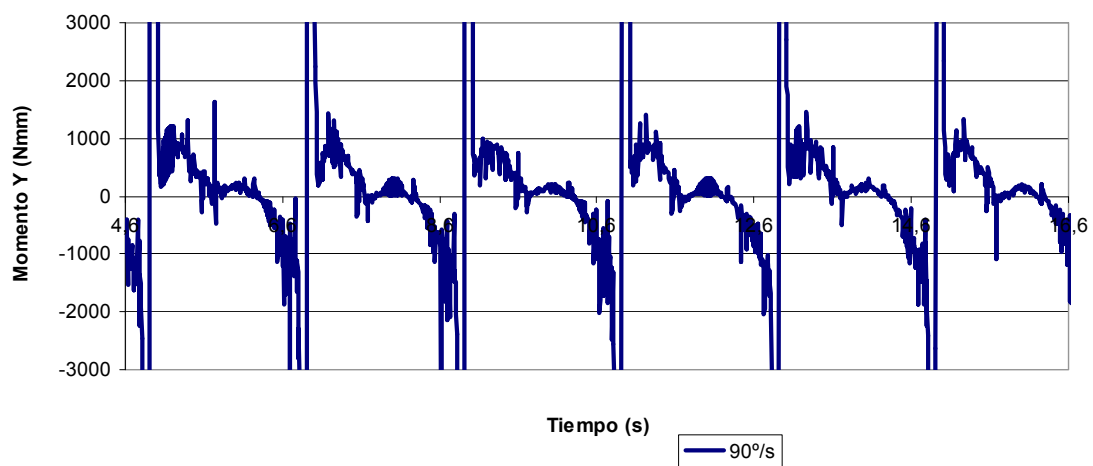


Figura 5.5.36 Momento en Y para 180°/s de velocidad de giro de motor del marker 89 con datos filtrados

Como podemos ver en la gráfica el valor del momento en Y será el de mayor valore, ya que es en la dirección Y la que hará girar la manivela haciendo que ésta mueva el resto de la pierna del robot haciendo que camine.

▪ Eje Z:

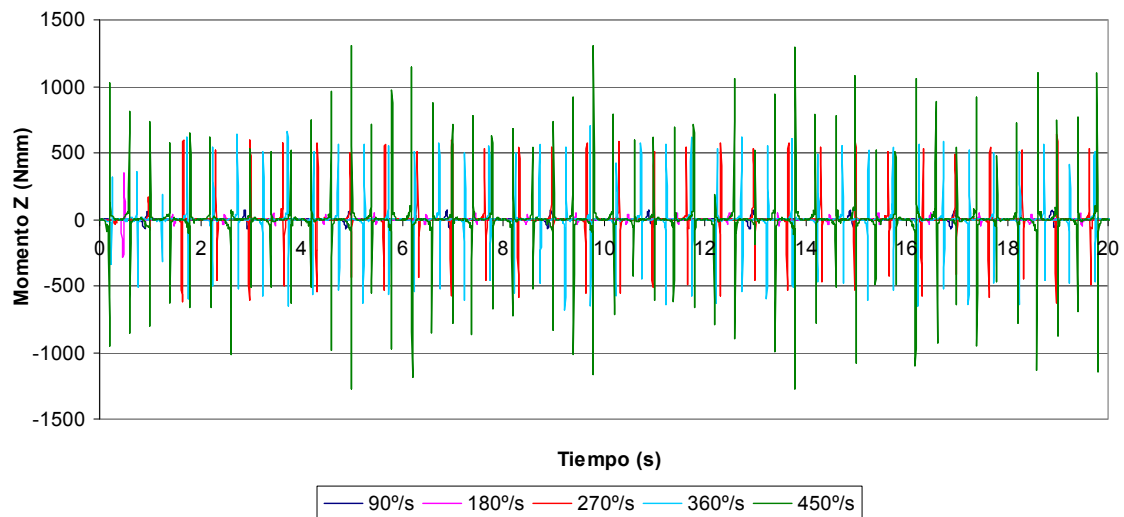


Figura 5.5.37 Momento para las distintas velocidades de giro de motor en Z del marker 89

CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES

Podemos concluir que se han alcanzado todos los objetivos planteados para el presente proyecto. El objetivo principal del proyecto consistía en realizar un estudio en profundidad del robot bípedo Pasibot y de sus puntos críticos, y ver su evolución al variar la velocidad de avance.

Para alcanzar el este objetivo principal fue necesario completar una serie de sub-objetivos, los cuáles se han cumplido todos y cada uno de ellos:

- Se realizó la simulación de modelo implementado de Pasibot más actualizado (corregido y con corredera en T) en MSC Adams.
- Se realizó la toma de datos de todos los parámetros que el programa ofrecía para tomar datos, de cada uno de los markers del robot Pasibot.
- Se exportaron esos datos a programas de análisis para su tratamiento y se realizó un detallado estudio de todos los puntos del robot geométrica, cinemática y dinámicamente.
- Se obtuvieron los puntos del robot Pasibot específicos a los cuales se debía hacer un estudio a distintas velocidades debido a que eran los puntos más críticos en el comportamiento mecánico del robot. Estos puntos son las juntas o articulaciones de los pies, la rodilla y la manivela.
- Se realizaron nuevas simulaciones de los puntos seleccionados variando la velocidad de giro del motor, registrando los datos de todos los parámetros de estos puntos críticos.
- Finalmente, con estos datos, se realizó un análisis en profundidad de los efectos que se producen en el robot en la simulación de caminar.

Como conclusiones técnicas de este análisis podemos reseñar:

- Dependiendo de la velocidad de giro del motor que demos en la simulación con MSC Adams podemos ver que el robot se desplaza más lejos si esta velocidad de giro es mayor. Los desplazamientos del robot en el eje X (dirección del movimiento) varían desde los 2,4 m recorridos por el robot para 90 °/s a los 12,3 m recorridos con 450 °/s de velocidad de giro del motor.

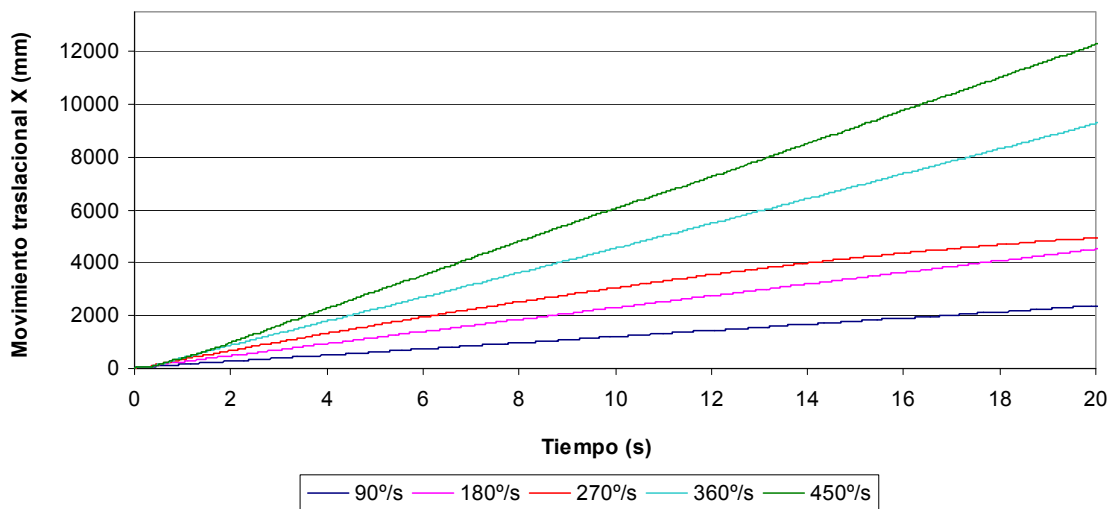


Figura 6.1.1 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en X del marker 89

- En lo que se refiere al movimiento hemos visto como el robot Pasibot debido a su diseño se desvía hacia los lados en su recorrido a la hora de caminar. Estas desviaciones dependen de la velocidad de giro del motor. A mayor velocidad de giro del motor el robot se desvía más hacia un lado. También dependiendo de la velocidad de giro del motor el robot gira hacia su derecha o hacia su izquierda llegando a desplazarse un máximo de 4,4 m hacia su derecha y 2 m hacia su izquierda.

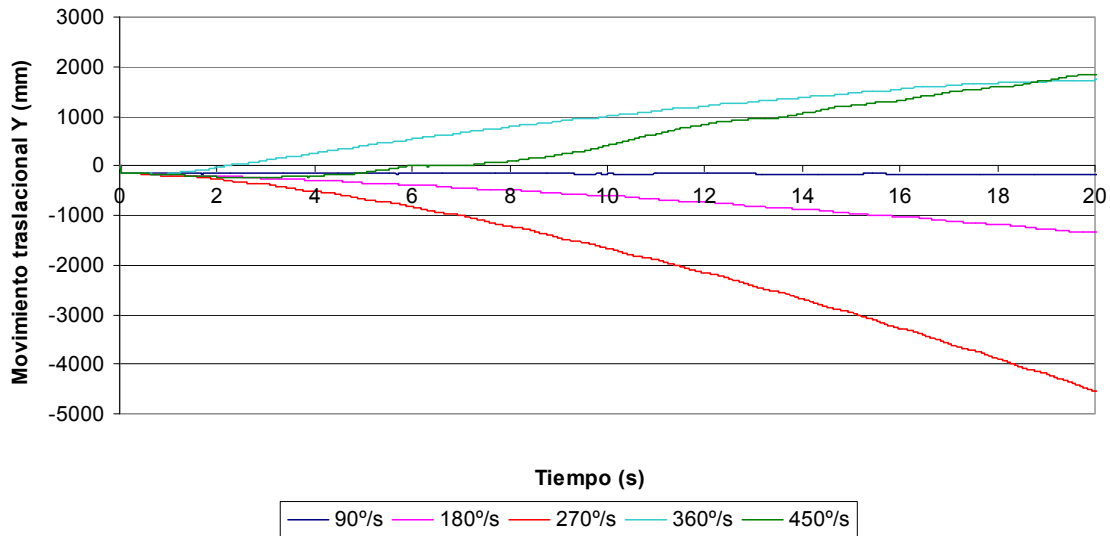


Figura 6.1.2 Movimiento traslacional para las distintas velocidades de giro de motor en Y del marker 89

- Como era de esperar la velocidad traslacional en el eje X (velocidad de avance del robot Pasibot en su dirección de movimiento) aumenta al aumentar la velocidad de giro del motor, tanto en sus valores máximos como mínimos.

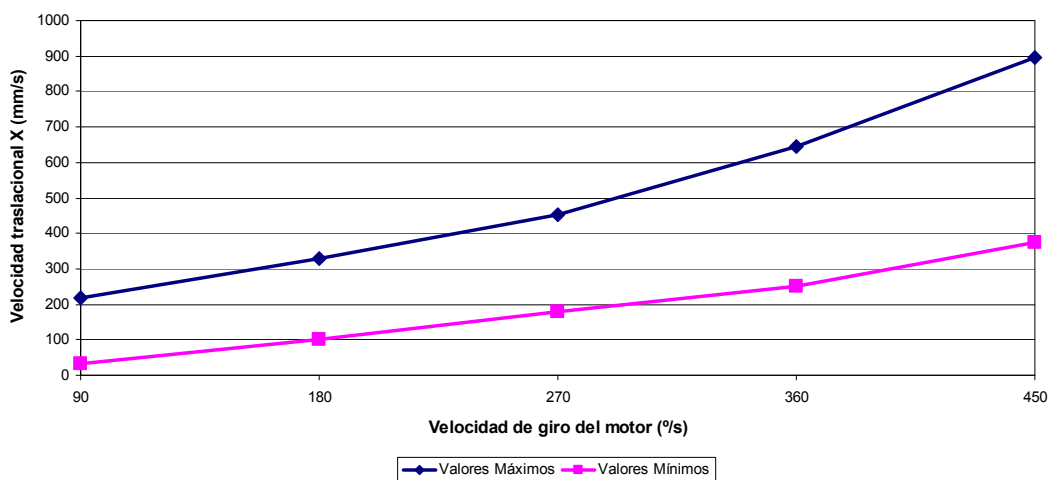


Figura 6.1.3 Velocidades traslacionales máx y mín X para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

- Durante el movimiento que realiza el robot al caminar podemos como según aumentamos la velocidad de giro del motor, el robot Pasibot se vuelve más inestable. Esto es fácil de ver gracias a los datos aportados por la simulación de MSC Adams para los parámetros de velocidad traslacional y aceleración traslacional en el Z (eje vertical). Elegimos el marker 89, que está situado a la altura de la cadera y que no tiene ningún movimiento relativo, y vemos en la Figura 6.1.4 y Figura 6.1.5 como los valores máximos y mínimos van

aumentado en valor absoluto haciendo que el robot se mueva cada vez más deprisa en esta dirección haciendo el caminar del robot más inestable.

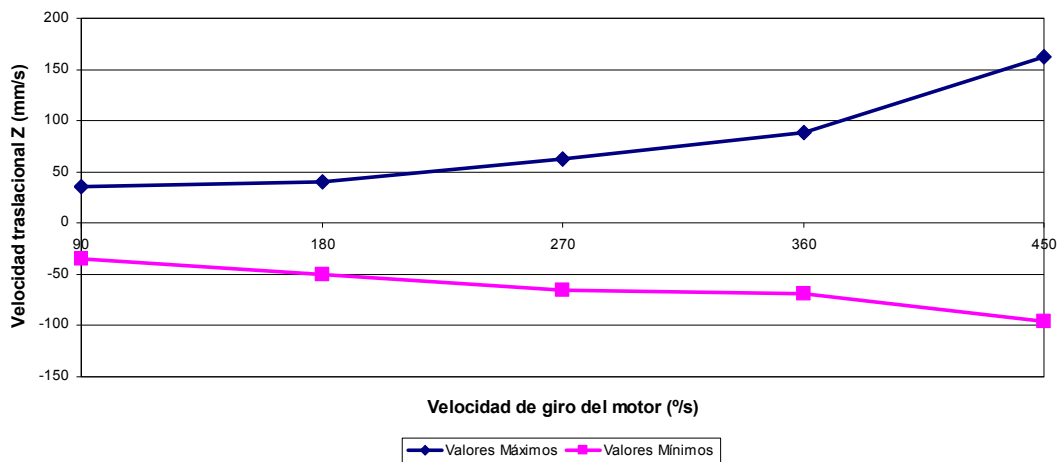


Figura 6.1.4 Velocidades traslacionales máx. y mín. en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

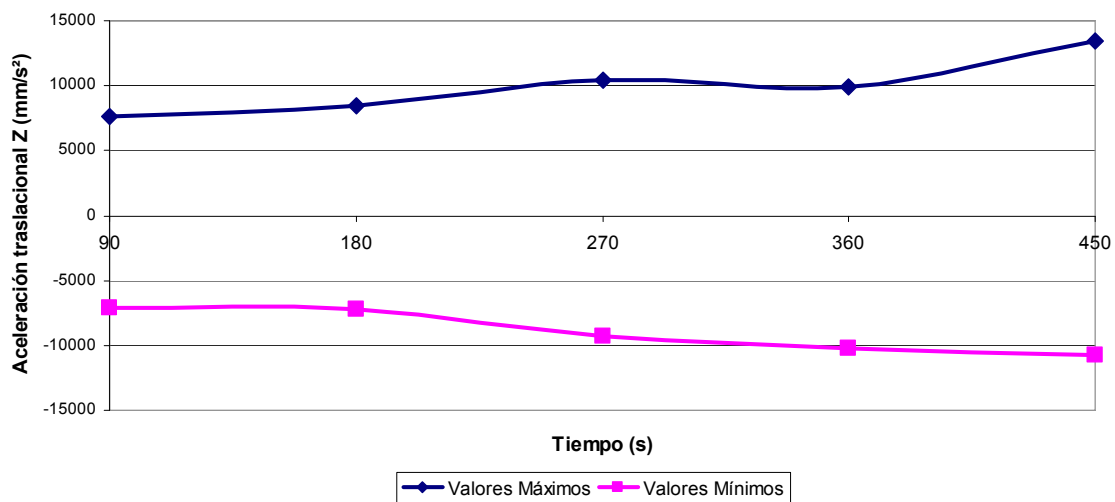


Figura 6.1.5 Valores máximos y mínimos de Aceleración traslacional en Z para las distintas velocidades de giro del motor del marker 89

- Si entramos en el aspecto de los esfuerzos soportados por las articulaciones del robot podemos ver un caso interesante en los markers estudiados pertenecientes al pie. Si estudiamos los esfuerzos soportados por ambos markers y cruzamos gráficas de los dos puntos de articulación en el pie podemos ver como los valores del esfuerzo en un marker serán aproximadamente los opuestos. Esto lo podemos apreciar en la *Figura 6.1.6* y *Figura 6.1.7*. Esto nos indica la relación existente entre ambos puntos de articulación, ya que no olvidemos que ambos pertenecen a un mismo elemento que es el pie. Esto ocurre para todos los esfuerzos soportados por ambas articulaciones.

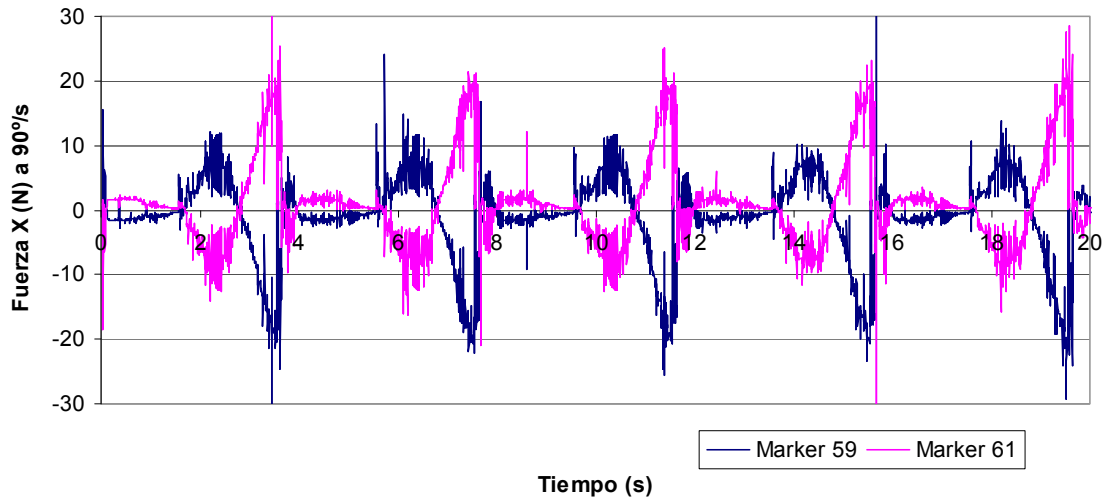


Figura 6.1.6 Valores de la Fuerza en X para los markers 59 y 61

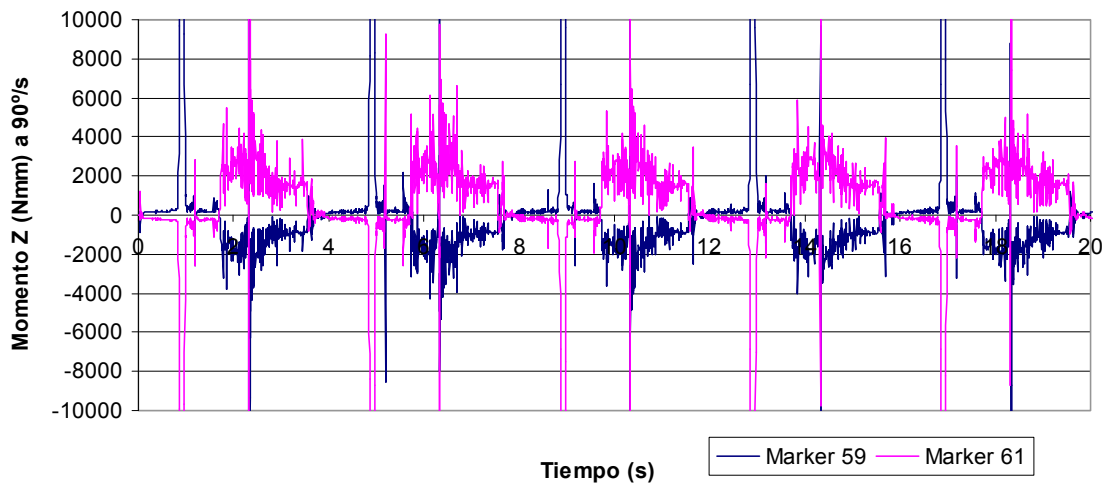


Figura 6.1.7 Valores del Momento en Z para los markers 59 y 61

- Antes de analizar los valores máximos de los esfuerzos soportados por las articulaciones del pie cabe señalar que como hemos podido en las gráficas de los esfuerzos de estos markers (Anexo A3 y A4), es que el valor de la velocidad de giro del motor no varía el valor de los esfuerzos soportados, con lo que podemos decir que ambos parámetros son independientes.
- Otro aspecto a destacar de los esfuerzos soportados por las articulaciones del pie es su valor, ya que así podemos saber las reacciones soportadas por los pies al caminar. En cuanto a las mayores fuerzas soportadas por las articulaciones del pie podemos decir que son en dirección Z, con lo que vienen dadas por el peso del robot al caminar y apoyarse sobre los puntos que estamos estudiando. El valor máximo de la fuerza soportada por las articulaciones es de **75 N**, podemos verlo en la *Figura 6.1.8*.

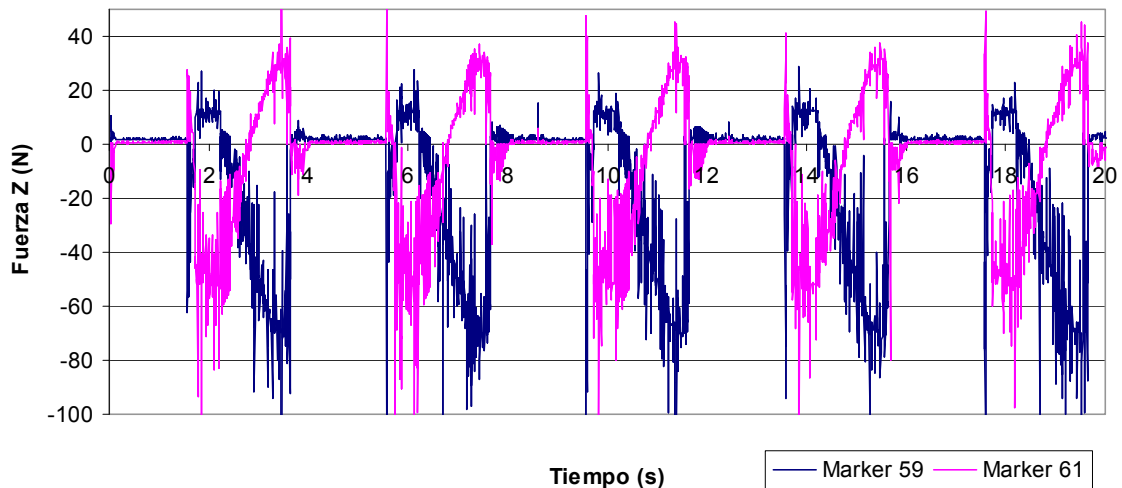


Figura 6.1.8 Valores del Fuerza en Z para los markers 59 y 61

- En cuanto a los valores de los momentos para las articulaciones del pie podemos decir que tienen un valor máximo aproximado de 2000 Nmm para el marker 59 con sentido negativo del eje Z, y de 4000 Nmm para el marker 61 en el sentido positivo del eje X. El marker 61, o la articulación trasera del pie es la que sufre mayores esfuerzos.
- Como ya he comentado anteriormente en el apartado 5.5, en el modelo virtual de Pasibot estudiado se producen unos picos en los esfuerzos en las juntas y en el contacto, que no concuerdan con lo esperado, pues provocan unos picos en los valores fuera de la realidad. Como ya he comentado antes, estudiando el modelo del robot en el que se basa este proyecto, y otro modelo anterior sin la deslizadera en T, podemos ver que siendo esta la única diferencia entre ambos modelos será esta la razón por la que se produzcan estos picos en los valores, fruto de un error en el programa de simulación.

6.2 DESARROLLOS FUTUROS

En mi opinión el proyecto de fin de carrera que he realizado tiene una gran importancia para próximos estudios a realizar sobre el robot Pasibot. Con los datos obtenidos en este documento y toda la información recabada sobre el comportamiento del robot Pasibot, se pueden realizar todo tipo de nuevas mejoras dependiendo que factor se desee evolucionar.

- A partir de los resultados obtenidos se podría estudiar un nuevo sistema de ayuda al sistema biela-manivela, y a su transmisión al resto del robot para conseguir un caminar más fluido.
- Una vez estudiados los datos de los esfuerzos que se dan en los distintos puntos del robot Pasibot podría considerarse modificar los elementos que soportan los esfuerzos más grandes para evitar una rotura, o hacer más livianos aquellos elementos que apenas se vean exigidos en este aspecto.
- Vistas las reacciones que se producen en el robot cabría la posibilidad colocar un sistema de muelles en la pierna pudiéndose eliminar parte de sus elementos, consiguiendo así que el robot sea más ligero.
- También se podría hacer un estudio comparativo con otro modelo de robot en el que el centro de gravedad se coloque en un sitio distinto modificando la geometría del robot en la simulación.
- Como hemos en el elemento manivela se producen una serie de picos en los datos de los esfuerzos de la simulación, a partir de los cuáles se podría estudiar el mejor método para eliminar este foco de error.
- Otro estudio a realizar sería modificar el material de diseño del robot en la simulación, lo que cambiaría su peso y su rozamiento y comparar ambos modelos.

CAPÍTULO VII: PRESUPUESTO

7.1 INVERSIÓN DE TIEMPO EN EL ESTUDIO

Para la elaboración de un presupuesto riguroso es necesario contar con información acerca de las herramientas utilizadas, de su coste, del tiempo empleado con cada una de ellas, o de su amortización entre otras. Para ello he realizado un esquema en el que se puede ver cronológicamente las fases del proyecto realizado, con lo que vemos que herramienta se ha utilizado y durante cuánto tiempo.

1. Planteamiento de objetivos: 2 semana

Durante esta primera fase la única actividad fue establecer reuniones con el tutor y buscar cuál sería el tema de estudio para el proyecto de fin de carrera. Fue necesario estudiar las posibilidades y ver cuáles eran las más factibles y ver cuál era la más interesante.

2. Búsqueda de información: 8 semanas

Antes de empezar a hacer nada fue necesario familiarizarse con el campo de trabajo sobre el que realizaría el presente proyecto. Para recabar información consulté revistas científicas, de ingeniería, pero sobre todo sobre robótica como es obvio. Sin embargo a la hora de encontrar información más específica sobre el tema que trato en este proyecto fueron los proyectos de fin de carrera realizados por compañeros de titulación, y que trataban sobre el mismo robot que el mío.

3. Toma de contacto con programas informáticos: 3 semanas

Para la mayoría de los programas informáticos utilizados en este proyecto de fin de carrera no fue necesario un periodo de aprendizaje previo al uso de los mismos, ya que ya tenía experiencia previa con ellos. Sin embargo con el programa de simulación utilizado, MSC Adams, no tenía ninguna experiencia con lo que fue necesario realizar diversos ejemplos tocando las partes fundamentales del programa que posteriormente serían necesarias para la importación de archivos y simulación.

4. Simulación y toma de datos: 8 semanas

Durante esta fase del proyecto se realizó las distintas simulaciones necesarias, y se tomaron los datos pertinentes para los puntos a estudiar en el proyecto. En el archivo perteneciente a cada de las simulaciones con distintas velocidades, se almacenaron los datos pertenecientes a cada simulación con su velocidad, y que después se exportarían y procesarían.

5. Procesado y análisis de datos: 16 semanas

Durante esta fase del proyecto se exportaron los datos obtenidos de todas las simulaciones, para posteriormente elaborar las gráficas pertinentes con el programa de procesamiento de datos Microsoft Excel.

6. Análisis de resultados y conclusiones: 8 semanas

Una vez asilada cada una de las curvas de todos los parámetros a estudiar de los elementos del robot, se estudió el comportamiento del robot Pasibot a distintas velocidades. Después se compararon los datos obtenidos para un mismo punto del robot a distintas velocidades de giro del motor. Y para terminar se establecieron las conclusiones extraídas del estudio del comportamiento del robot Pasibot a distintas velocidades de giro del motor.

Tabla 7.1 Desarrollo cronológico de las fases del proyecto

FASE	1	2	3	4	5	6
SEMANAS	0-2	3-10	11-13	14-21	22-37	38-45

7.2 COSTE DEL ESTUDIO

Para la realización del proyecto se han utilizado una serie de herramientas. Una estación de trabajo con acceso a los programas Solid Edge ST y MSC.Adams. El coste de la estación de trabajo, contando con que no será destinado únicamente al uso de este proyecto, será de alrededor de 2.000 €. A dicho coste se le debe añadir el precio de la impresora láser a color que tiene un valor de 480 €. A todo el equipo se le presupone una depreciación de 24 meses, dedicándole un total de 6 meses al uso de dichos equipos.

Al coste del equipo se le debe añadir el coste de la licencia del Solid Edge ST y del MSC.Adams, que tienen un coste de 6.000 y 15.000 € respectivamente. Ambos programas tienen una amortización aproximada de 1/6.

A lo largo de los doce meses que se han dedicado a la realización de este proyecto, se ha dividido el tiempo en: 260 horas al diseño y la simulación del Robot PASIBOT con ambos programas, y 80 horas a la redacción de la memoria completa. El salario de un ingeniero con las facultades para realizar el diseño y la simulación con ambos programas es de 80 euros por hora, mientras que para la redacción de la memoria el coste de un ingeniero es de 25 € por hora.

En la Tabla 7.2.1 podemos ver el desglose de los costes relacionados con mi proyecto de fin de carrera.

Tabla 7.2 Desglose de los costes del proyecto

PERSONAL			
Descripción	Horas	Coste por hora (€/h)	Coste imputable (€)
Diseño en Solid Edge ST	40	60	2.400
Diseño y simulación en MSC.Adams	220	80	17.600
Redacción	80	25	2.000
EQUIPO ¹			
Descripción	Coste (€)		Coste imputable (€) ²
Ordenador	2.000		500
Impresora Láser	480		120
SOFTWARE ³			
Programa	Coste licencia (€/año)		Coste imputable (€)
Licencia Solid Edge ST	6.000		1.000
Licencia MSC.Adams	15.000		2.500
SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS			
Descripción			Coste imputable (€)
Gastos de material de oficina e impresión del documentos			280
Otros gastos imputables (gastos indirectos derivados)			400
TOTAL			26.800 €

¹ La depreciación del equipo se realiza en 24 meses, dedicándole un uso máximo de 6 meses.

² Precio del equipo según el uso en función de la depreciación.

³ El software tiene una amortización de 1/6.

CAPÍTULO VIII: BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- **Fuentes en internet:**

- [1] http://www.cienciapopular.com/n/Tecnologia/Androides_Humanoides_y_Cyborgs/Androides_Humanoides_y_Cyborgs.php
Fecha de última visita: 14/02/2011
- [2] <http://automata.cps.unizar.es/robotica/INTRODUCCION.pdf>
Fecha de última visita: 27/01/2011
- [3] <http://mimosa.pntic.mec.es/jgomez53/matema/conocer/chebyshev.htm>
Fecha de última visita: 03/04/2011
- [4] <http://es.wikipedia.org/wiki/Pantógrafo>
Fecha de última visita: 03/04/2011
- [5] <http://www.protdesign.com/Synchronous%20Technology.pdf>
Fecha de última visita: 19/05/2011
- [6] <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>
Fecha de última visita: 21/06/2011

- **Publicaciones:**

- 1) PFC: Hernández Molina, Carlos: *Análisis del vuelco lateral del robot PASIBOT. Diseño de un mecanismo compensador*, Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- 2) PFC: Corral Abad, Eduardo: *Análisis mecánico del robot bípedo "PASIBOT"*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- 3) PFC: Espantoso Miranda, Víctor: *Modelado y simulación del robot PASIBOT. Estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- 4) PFC: García De Oteyza Háfner, Óscar: *Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot*. Universidad Carlos III, Madrid, 2010.
- 5) PFC: Redondo Perales, Alejandro: *Análisis y simulación del comportamiento del robot bípedo Pasibot*. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.

- 6) PFC: Javier Pérez Caballero: *Diseño y análisis de un nuevo sistema de estabilización para el robot bípedo Pasibot* Universidad Carlos III, Madrid 2009
- 7) Joseph E. Shigley, Gordon R. Pennock y John J. Uicker: *Teoría de máquinas y mecanismos*. Editorial “Mc-graw-hill”.

